



TITLE:

第56回自然災害科学総合シンポジウム (2019年度京都大学防災研究所重点推進型共同研究) 講演論文集

AUTHOR(S):

CITATION:

第56回自然災害科学総合シンポジウム (2019年度京都大学防災研究所重点推進型共同研究) 講演論文集. 自然災害科学総合シンポジウム講演論文集 2019, 56: 1-52

ISSUE DATE:

2019-09-11

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/244305>

RIGHT:

第 56 回自然災害科学総合シンポジウム

(2019 年度京都大学防災研究所 重点推進型共同研究)

講演論文集

2019 年 9 月 11 日 (水)

於：キャンパスプラザ京都 第 1 講義室

主催

京都大学防災研究所 自然災害研究協議会

第 56 回自然災害科学総合シンポジウム

ー 頻発・甚大・広域化した 2018 年の自然災害を振り返って ー

主 催： 京都大学防災研究所自然災害研究協議会
日 程： 2019 年 9 月 11 日（水）11 時 00 分～16 時 40 分（終了予定）
場 所： キャンパスプラザ京都 第 1 講義室
〒600-8216 京都市下京区西洞院通塩小路下る
参加費： 無料
備 考： 本シンポジウムは、土木学会認定 CPD プログラムです。

プログラム

10：30～ 受付

11：00

開会挨拶

自然災害研究協議会議長 釜井 俊孝（京都大学防災研究所）

11：10～11：50

【科学研究費補助金・特別研究促進費による突発災害調査研究平成 29・30 年度報告】
「2018 年草津白根火山噴火に関する総合調査」

小川 康雄（東京工業大学理学院火山流体研究センター）

11：50～12：30

【科学研究費補助金・特別研究促進費による突発災害調査研究平成 30 年度報告】
「平成 30 年 7 月豪雨による災害の総合研究」

山本晴彦（山口大学大学院創成科学研究科）

12：30 昼食

13：30～14：10

【科学研究費補助金・特別研究促進費による突発災害調査研究平成 30 年度報告】
「平成 30 年北海道胆振東部地震とその災害に関する総合調査」

高橋浩晃（北海道大学大学院理学研究院）

14：10～14：50

【科学研究費補助金・特別研究促進費による突発災害調査研究平成 30 年度報告】
「平成 30 年台風 21 号による強風・高潮災害の総合研究」

丸山敬（京都大学防災研究所）

14：50～15：10 休憩

15：10～15：40

【自然災害研究協議会突発災害調査報告】
「硫黄山噴火に伴う河川汚濁水が水稻栽培に与える影響」

山田真義（鹿児島工業高等専門学校）

15：40～16：10

【防災研究所共同研究・地域防災実践型共同研究】
「持続可能な防災まちづくりと防災人材育成に関する研究」

佐藤健（東北大学災害科学国際研究所）

16：10～16：30

・ 総合討論
・ 閉会挨拶

目次

【科学研究費補助金・特別研究促進費による突発災害調査研究平成 29・30 年度報告】

- 「2018年草津白根火山噴火に関する総合調査」 1
小川 康雄（東京工業大学理学院火山流体研究センター）

【科学研究費補助金・特別研究促進費による突発災害調査研究平成 30 年度報告】

- 「平成 30 年 7 月豪雨による災害の総合研究」 7
山本晴彦（山口大学大学院創成科学研究科）

- 「平成 30 年北海道胆振東部地震とその災害に関する総合調査」 21
高橋浩晃（北海道大学大学院理学研究院）

- 「平成 30 年台風 21 号による強風・高潮災害の総合研究」 27
丸山敬（京都大学防災研究所）

【自然災害研究協議会突発災害調査報告】

- 「硫黄山噴火に伴う河川汚濁水が水稻栽培に与える影響」 41
山田真義（鹿児島工業高等専門学校）

【防災研究所共同研究・地域防災実践型共同研究】

- 「持続可能な防災まちづくりと防災人材育成に関する研究」 45
佐藤健（東北大学災害科学国際研究所）

2018年草津白根火山噴火に関する総合調査 —草津白根山火山噴火から1年—

小川康雄¹・青山裕²・山本希³・筒井智樹^{4*}・寺田暁彦¹・大倉敬宏⁵・神田径¹・
小山崇夫⁶・金子隆之⁶・大湊隆雄⁶・石崎泰男⁷・吉本充宏⁸・石峯康浩⁹・野上健治¹・
森俊哉¹⁰・木川田喜一¹¹・片岡香子¹²・松元高峰¹²・上石勲¹³・山口悟¹³・伊藤陽一¹³・
常松佳恵^{8, 14}

- 1 東京工業大学理学院火山流体研究センター
 - 2 北海道大学理学研究院
 - 3 東北大学理学研究科
 - 4 秋田大学国際資源研究科
 - 5 京都大学理学研究科
 - 6 東京大学地震研究所
 - 7 富山大学大学院理工学研究部
 - 8 山梨県富士山科学研究所
 - 9 鹿児島大学地震火山地域防災センター
 - 10 東京大学理学系研究科
 - 11 上智大学理工学部
 - 12 新潟大学災害・復興科学研究所
 - 13 防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター
 - 14 山形大学理学部
- *現在 京都大学防災研究所

要 旨

草津白根山では、近年の火山活動が湯釜火口周辺に限定されていた。2014年からは、湯釜火口周辺で活動が高まり、山体の膨張を伴う地震活動、熱活動、火山ガス成分の変化が観測され、2年後には活動が終息した。一方で、1500年間活動のなかった本白根山鏡池北火口で、2018年1月23日に顕著な前駆的活動を伴わない水蒸気噴火が発生し、人的な被害が生じた。この噴火を受けて2018年度、2019年度に、地震学・測地学・地球電磁気学・地球化学・地質学に渡る科研費研究が実施された。噴火に先立って前兆的な現象の有無について、それぞれの分野で検討がなされた。また水蒸気噴火後にマグマ噴火への移行の可能性もありモニタリング研究を継続したが、現状では、本白根火山鏡池北火口の再活動の兆しは見当たらない。一方、草津白根山湯釜火口付近は、2018年4月、同9月、2019年5月に傾斜変動を伴う地震活動が発生し、再び活動的になってきている。

キーワード：草津白根山，水蒸気噴火，本白根山，白根山，前兆的現象，活動の推移

1. はじめに

群馬県北西部に位置する活火山である草津白根火山は、3山体（白根山・逢ノ峰・本白根山）で構成される。1805年以来、草津白根山の活動は、白根山山頂周辺（湯釜火口・水釜火口）を中心とする水蒸

気噴火活動が知られている（宇都ほか 1983，寺田，2018）。これまで地球化学的研究（Ohba et al., 1994, 2000; Ohwada et al., 2003）や地震学的研究（Nakano et al., 2003; 森ほか，2006）・測地学的研究（寺田ほか，2014），地球電磁気学的研究（Takahashi and

Fujii, 2011; Nurhasan et al. 2006, Ogawa et al., 2016) が行われてきたが、これらの研究は、白根山の湯釜水釜火口周辺に集中していた。

2. 2014年の草津白根山(白根山(湯釜付近))の活動

2000年の東京工業大学火山流体研究センター発足とともに、草津白根山湯釜火口周辺に3箇所のボアホール型地震計および傾斜計からなる火口監視観測システムが整備された(森ほか, 2006)。ここではそれ以降の草津白根山の観測研究を簡単にレビューする。2001年以降の活動についてみると、2008年以前の火山活動は、静穏な状態が続いていた。2008年に湯釜火口北壁に赤外カメラおよび目視によって高温域が発見され、新たな噴気活動が確認された。

2014年3月には、湯釜・水釜火口周辺で地震活動が活発化し、8月まで日別の地震回数が100回に至るイベントが発生した。地震活動の活発化の開始と同時に、湯釜水釜火口を取り囲むボアホール傾斜計が山体の等方的な膨張を示し始め、その膨張は地震活動が低調化した8月以降も継続し、翌2015年8月まで継続した。この等方圧力源は湯釜水釜火口境界の海拔1500m(地表下500m)に推定された。また、この活動に伴い、湯釜北側噴気帯の硫化水素濃度が急激に低下していることが観測された。3月の地震活動と山体膨張に2ヶ月遅れて、湯釜湖水の水温が上昇を始め、膨張終了後も平年よりも放熱量で1.5倍高い状態が継続した。地磁気観測からも5月に急激な山体の消磁が観測された。このことは、3月の高温の火山ガス・熱水の貫入イベントの後、熱的な擾乱が地表付近で観測されるまでに2ヶ月を要したということになる。

この湯釜・水釜周辺の活動イベントについて、その位置を3次元比抵抗モデルと比較すると、地震の震源、地殻変動力源、消磁源が、低比抵抗かつ不透水性を示す粘土キャップの内部で発生していることが推定された。このように、2014年-2015年のイベントは、地震・地殻変動・火山ガス・地磁気によってモニタリングされ、かつ、3次元比抵抗構造モデルによってそのカラクリが示されることとなった。水蒸気噴火は未遂であったが、これまでの当センターで行ってきた稠密な他項目観測が、地下浅部の火山活動評価に大変有効であることを示した。

3. 2018年の草津白根山(本白根山)の活動

2014年の火山活動の活発化は、東京工業大学のボアホール型の地震・傾斜観測網でその推移がモニターされたのに対し、2018年1月23日に発生した本白根山鏡池北火口での噴火は、予見することが困難であった。顕著な前兆的観測データは、噴火のわずか2

分前の火山性微動のみであった。鏡池北火砕丘の再活動は1500年ぶりで、あらためて水蒸気噴火の予測の困難さを認識させられた。本白根山のスキー場では、噴石により人的な被害が発生した。

本稿では、科研費“2018年草津白根山噴火に関する総合調査”の成果を中心として以下に述べる。昨年までの成果については、小川ほか(2018)ですでに述べられているので、なるべく内容の重複は避ける。

3.1 草津白根山(本白根山)の地震観測

草津白根山の過去の噴火事例では、水蒸気噴火が繰り返されたことがあり、より大規模な活動への発展の可能性も指摘された。そのため、東工大・北大・秋田大・東北大のメンバーによって、本白根噴火後の数日間で、本白根火山周辺に地震観測点を緊急的に3箇所増設し、リアルタイムで地震波形データを伝送・集約することを実現した。3地点の臨時観測点を追加し統合処理することで、本白根火砕丘周辺の地震活動の把握が可能になった。データを気象庁にも転送し、2018年1月31日からは監視業務でも活用されることとなった。

噴火以前の3か月前までのデータを再解析し、震源の時空間変化・低周波地震の発生状況等の精査を行った。2018年1月23日噴火前後の火山性地震活動について、2018年1月23日噴火前は検出基準以上のものは月数イベント程度で、主にA型地震であることがわかった。噴火後・臨時観測開始以降は、多数のB型地震とハイブリッド型の地震が発生し、震央は、湯釜周辺と本白根山北側の2領域に集中している。2018年4月下旬には、湯釜周辺の地震活動が一時的に急増するイベントが発生し、本白根側の地震活動が静穏化している。

本白根噴火前の前兆的な微小地震活動については、Matched Filter法による微小地震の検出を行った。特に鏡池北火砕丘周辺の地震活動の様相を明らかにするために、当該領域で発生した地震をテンプレートとして、それらと波形相似性の高い微小地震を検出することによって、通常のルーチン処理に比べ数倍～10倍程度の地震(B型地震)を検出できたが、1月23日噴火直前の急激な地震発生数変化等の前兆的变化は明瞭には認められなかった。また、地震波干渉法による構造変化の推定を行った。噴火前後の火山体構造・熱水系の時間変化の抽出を狙い、草津白根山周辺の定常地震観測点の連続記録(雑微動記録)を用いた。しかしながら本白根山の噴火前後で有意な変化は認められなかった。

3.2 草津白根山(本白根山)の地盤変動観測

東京工業大学では、2017年から草津白根火山（白根山・逢ノ峰・本白根山）を取り囲む半径15kmのエリアを対象とした広域的なGNSS繰り返し観測ネットワークの構築を開始していた(Noguchi et al., 2019)。2018年1月の本白根山の水蒸気噴火はその中で発生した。

本白根山噴火前後の地盤変動については、白根山湯釜をとりまく3点のボアホール観測点と地上観測点2点の傾斜計で詳細が捉えられた。噴火前の9時59分58秒から10時02分10秒まで湯釜南方が隆起を示し、噴火後10時02分10秒から10時10分00秒まで湯釜南方が沈降する傾斜変動が捉えられた。これらを本白根山鏡池北火口の開口クラックで説明することができる。開口量1.7m、噴火前の膨張体積42.5万 m^3 、噴火後の収縮体積30万 m^3 と推定された。

1月23日以降の本白根火山の活動推移を把握するためには、地盤変動観測を観測し、熱水やマグマの動きを監視することが不可欠であるが、噴火当時のGNSSおよび傾斜観測網は本白根山から2kmほど北の白根山湯釜火口周辺に集中していた。そのため、本白根山直下の圧力源や深部の圧力源に対しては検出が困難である。この問題を解決するために、2017年秋に整備してきた繰返し観測点を8箇所の中の5箇所について、連続観測が可能となるように機能強化を行なった。これにより本白根山直下のマグマの動きをリアルタイムに把握できるようになり、マグマ噴火への移行可能性を判断する材料を提供することができる。GPS記録からは、本白根火山噴火に伴う変動や、その噴火後のマグマの貫入に伴う変動などは捕らえられていない。

3.3 草津白根山（本白根山）の熱観測

2018年3月19日に本白根火砕丘外側の東～北側斜面の空中赤外線観測を、4月28日には夜間空中赤外線観測を行なったが、新火口で温度異常は認められていない。また、その後5月5日、5月11・12日に新火口における地表温度測定（接触式温度計）および赤外線カメラ撮影を行なったが、地熱異常は認められていない（草津白根山降灰合同調査班、2018）。

火山体を構成する岩石中の磁性鉱物がキュリー点以上の温度になると磁性を失うことを利用して、地球磁場を測定することによって火山体の温度構造の変動を捉えることができる。2018年3月6-7日および6月18日に無人ヘリコプターを用いた空中地磁気測定を行ない、2013年に国土交通省の実施した空中磁気測定データとの差を取ることで、温度構造の時間変化を推定した。その結果、本白根山火口周辺に顕著な変動は解明されなかったが、2013年以降、逢ノ峰の深部が高温化していると推定された。

3.4 草津白根山（本白根山）の噴出物調査

噴火直後から3月にかけて、草津白根山降灰合同調査班（2018）による調査、および4月から5月に追加調査がおこなわれた。当重量線図を作成し、Fierstein and Nathenson（1992）の手法により、総噴出物は3.6万トンと推定された。2014年の御嶽山の噴出物の1/10以下の規模である。

噴出物の産状から噴火推移を読み取ると、まず火口を開口させたフェーズ1では地表付近の岩石等を噴出し、それらは火口のごく近傍に堆積して下部層を形成した。その後のフェーズ2では噴煙が拡大し、遠方まで噴出物が輸送された。遠方相には火山灰凝集体が見られることから、湿潤な噴煙であったと考えられる。

本白根火砕丘群の熱水系の性質と噴火の推移に伴う変化を検討するために近傍の噴出物のユニットごとにXRD分析をおこなった。遠方の堆積物は、近傍の上部層と同様のピークとなった。同定された鉱物組合せから、高温酸性熱水による変質作用が生じていると考えられる。石英のピークが卓越し、粒子観察でもモザイク状石英が多数認められることから、本白根火砕丘群の地下には石英を主体とする珪化変質帯が形成されている可能性が高い。また、近傍の下部層と上部層を比較すると、上部層が熱水変質鉱物に富むことから、噴火の推移に伴い、より深部の熱水変質帯から噴出物がもたらされることで噴煙の規模が拡大したことが示唆される。

2018年1月23日噴火の噴石の最大長径分布および降下数密度を求めた。噴石は主火口の周囲500m圏内に分布し、北～北東にかけて集中的に分布することがわかった。ドローンによる空撮データからも同様に噴石の分布を求めた。噴石の長径と到達距離から初速度の下限が52-82(m/s)と推定された。

3.5 地球化学観測

火山灰に付着した水溶性成分について分析した。まず、水蒸気爆発に伴う噴出物にしては水溶性成分量が少いのが特徴である。これは、今回の噴火以前に新火口の地下浅所の熱水系の影響を受けていないことを意味している。そのため、噴火前に地下浅所での熱水活動はなかったと思われる。F、Cl、 SO_4 の分析の結果、草津白根山湯釜や本白根山山麓の万代鉱の温泉水とは異なり、Fが高いことがわかった。このことも、今回噴出した火山ガスが、地表付近の熱水系に影響されずに深部から直接、短時間に噴出していることを裏付ける。

CO_2 の拡散放出を新火口群で計測したが、 CO_2 放出が検出できたのは、鏡池北火口内のわずかに1箇所

のみであり、かつ、その放出率は $67.8\text{g/m}^2/\text{day}$ と、極めて小さかった。

さらに新火口に加えて、草津白根山火山周辺の主な噴気地である万座、北側噴気、殺生河原において土壌 CO_2 中の同位体を計測した。同位体を計測することによって、植物起源の CO_2 の影響を取り除くことができる。分析の結果、全ての噴気地域で $\delta^{13}\text{C}$ が、 -3.11 から -3.76 を示す。このことは、ほとんど同じ組成を示す高温の火山ガスが深部に広域的に存在していることを示唆する。

3.6 融雪泥流評価

積雪期に発生した噴火のため、融雪泥流評価を現地のパラメータに即して早急に行うことが防災上重要である。特に、噴火による融雪泥流および融雪期の激しい降雨と融雪にともなう(rain on snow型)泥流のリスク評価は重要である。

火山噴出物の物理特性(粒度、粘土含有量、粘土鉱物の種類)、泥流の粘着性・浸透能、泥流の内部摩擦角や粘着性の調査を行なった。噴出物については、砂粒子以下の粘土分が10wt%であり、粘性の低い流体が発生すると予想された。スノーサーバイを行い噴火前の積雪水量を計測し、噴火後の積雪量の観測を行なった。泥流が発生する可能性のある3地点において、準リアルタイムカメラと水位計を用いた河川モニターを実施した。

泥流のシミュレーションにはTITAN2Dソフトを用いて、噴火後に起こりうる3パターンの噴火推移シナリオ(噴火終息、水蒸気噴火発生、マグマ噴火発生)と3つの泥流発生モデル(融雪期のrain on snow型泥流、融雪期のシャーベット型泥流、噴火による融雪型泥流)を想定し複数の流下シミュレーションを行い、危険箇所を指摘した。

4. おわりに

1500年間活動がなかった本白根山鏡池北火口で、2018年1月23日に水蒸気噴火が発生し、人的被害が発生した。この噴火を受けて科研費“2018年草津白根山噴火に関する総合調査”が採択された。我々はこの課題の中で、噴火の推移の把握のために観測点を整備し、緊急観測を行い、リスクの軽減に努めた。この原稿の執筆段階では、噴火から1年半が経っているが、本白根山の活動は静穏化している。

一方で、2018年4月および9月に、白根山(湯釜付近)が再び活発化し、傾斜変動を伴う地震活動が高まっている。やや長期的な広域的な地殻変動のデータから、2011年以降草津白根山北西部(渋峠付近)に膨張源が推定されている。また2018年9月の地震活動と同調する地鳴りを伴う地震活動が草津白根山北

西の長野県高山村周辺で発生するようになり、草津白根山のマグマ供給系の深部が西側にある可能性も示唆されている。

草津白根火山の防災のためには、より広域的な観点から、また地質学的な時間スケールの観点からも、火口近傍だけでなく火山全体のシステムの研究を推進する必要がある。また、本白根山噴火に際して、有事の観測網の電源の維持が重要であることが認識された。リスクに対して冗長度のある観測システムの構築が望まれる。

謝 辞

文部科学省科学研究費補助金特別研究促進費「2018年草津白根山噴火に関する総合調査」(17K20141)による助成を受け、平成29年度および平成30年度に実施した研究の現時点までの成果をまとめたものである。また、文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」および「次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト」の支援も受けた。

参考文献

- 宇都浩三・早川由紀夫・荒牧重雄・小坂丈予(1983): 草津白根山地質図, 火山地質図 No.3, 地質調査所, 10p
- 草津白根山降灰合同調査班(2018): 草津白根山2018年1月23日噴火による降灰分布, 火山噴火予知連絡会資料
- 寺田 暁彦・神田 径・大倉敬宏・小川康雄(2018): 草津白根山・湯釜火口湖地下浅部への流体供給: 2014年3月以降の群発地震に伴う地殻変動と湖底熱活動の変化, 日本火山学会講演予稿集, B1-33
- 寺田暁彦(2018)水蒸気噴火発生場としての草津白根火山. 地質学雑誌, 124, 251-270,
- 濁川 暁・石崎泰男・亀谷伸子・吉本充宏・寺田暁彦・上木賢太・中村賢太郎, 草津白根火山本白根火砕丘群の完新世の噴火履歴, 日本地球惑星連合2016年大会予稿集, SVC48-11
- 森健彦・平林順一・野上健治・鬼澤真也(2006): 草津白根山における新たな地震観測システムの構築, 火山, 第51巻, 第1号, 41-47.
- 吉本充宏・本多亮・小森次郎・石峯康浩・山田浩之(2018): 草津白根火山, 本白根山2018年噴火の放出岩塊による被害調査の速報, 地球惑星科学連合大会, 幕張, 千葉
- Fierstein, J. and Nathenson, M. (1992): Another look at the calculation of fallout tephra volumes, Bull. Volcanol., 54, 2, 156-167.
- 小川康雄, 青山裕, 山本希, 筒井智樹, 寺田暁彦, 大倉敬宏, 神田 径, 小山崇夫, 金子隆之,

- 大湊隆雄, 石崎泰男, 吉本充宏, 石峯康浩, 野上健治, 森俊哉, 木川田喜一, 片岡香子, 松元高峰, 上石勲, 山口悟, 伊藤陽一, 常松佳恵 (2018), 2018 年草津白根山噴火に関する総合調査, 京都大学防災研究所自然災害研究協議会, 55, 25-30.
- Ogawa, Y., Nurhasan, Tank, S. B., Terada, A., Kanda, W., Nogami, K. (2016): Three dimensional magnetotelluric modeling of Kusatsu-Shirane volcano and its implications for recent volcanic unrest, presented at AGU Fall meeting, San Francisco, USA.
- Ohba, T., Hirabayashi, J. and Nogami, K. (1994), Water, heat and chloride budgets of the crater lake, Yugama, at Kusatsu-Shirane volcano, *Geochem. J.*, 28, 217–231.
- Ohba, T., Hirabayashi, J., and Nogami, K. (2000), D/H and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios of water in the crater lake at Kusatsu-Shirane volcano, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 97, 329–346.
- Ohwada, M., Ohba, T., Hirabayashi, J., Nogami, K., Nakamura, K. and Nagao, K. (2003): Interaction between magmatic fluid and meteoric water, inferred from $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{36}\text{Ar}/\text{H}_2\text{O}$ ratios of fumarolic gases at the Kusatsu-Shirane volcano, Japan, *Earth Planets Space*, 55, 105–110, 2003.
- Nakano, M., Kumagai, H., and Chouet, B. A. (2003): Source mechanism of long-period events at Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, inferred from waveform inversion of the effective excitation functions, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 122, 149–164.
- Noguchi, R., T. Nishizawa, W. Kanda, T. Ohkura, A. Terada, Installation of new GNSS network around Kusatsu-Shirane Volcano, Japan: Its perspective and the first result, *J. Disast. Res.*, 14, 744-754, doi:10.20965/jdr.2019.p0744, 2019.
- Nurhasan, Ogawa, Y., Ujihara, N., Tank, S. B., Honkura, Y., Onizawa, S., and Mori, T. (2006): Two electrical conductors beneath Kusatsu-Shirane volcano, Japan, imaged by audiomagnetotellurics, and their implications for the hydrothermal system, *Earth Planets Space* 58, 1053-1059.
- Takahashi, K. and Fujii, I. (2014), Long-term thermal activity revealed by magnetic measurements at Kusatsu-Shirane volcano, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 285, 180-194.

平成30年7月豪雨による災害の総合研究 — 平成30年度科学研究費補助金（特別研究促進費） —

山本 晴彦

研究代表者 山口大学大学院創成科学研究科

要 旨

「平成30年7月豪雨」について、①数日にわたり広域的な豪雨を継続させた線状降水帯の発生成明、②大規模な洪水災害を引き起こしたメカニズムの解明、③多発した土砂災害におけるメカニズムの解明、④防災情報の住民への伝達と避難の実態解明、⑥都市開発の歴史と災害リスクの変遷に焦点を絞り、研究組織を構成し、研究調査を実施した。ここに、得られた研究成果について、その一部を報告する。

1. はじめに

2018年7月5日から7日にかけて、梅雨前線が九州北部から近畿地方に停滞し、長時間にわたり豪雨が続いた。本豪雨により、各地で河川の氾濫や土砂災害が多発し、甚大な人的被害（死者224名、行方不明者8名）が生じ、住家の全半壊17,600棟、浸水被害は30,500棟に達する平成では最大の被害規模となり、気象庁により「平成30年7月豪雨」と命名された。

文部科学省研究開発局地震・防災研究課や自然災害研究協議会と協議を重ね、『平成30年7月豪雨による災害の総合研究』の研究課題名で交付を受け、①数日にわたり広域的な豪雨を継続させた線状降水帯の発生成明、②大規模な洪水災害を引き起こしたメカニズムの解明、③多発した土砂災害におけるメカニズムの解明、④防災情報の住民への伝達と避難の実態解明、⑥都市開発の歴史と災害リスクの変遷に焦点を絞り、近畿中国四国地方の防災研究者を中心に文理融合・オールジャパンで研究調査を実施した。

研究組織は、①気象、②水文学・河川工学、③地盤工学・砂防学、④防災情報・避難、⑤災害歴史・災害リスクの5グループで構成し、各グループにおける研究内容、グループ間での協力体制は図1に示す通りである。なお、各調査研究グループには研究推進を担当するグループリーダー（下線）を配置した。

研究組織は、山口大学、京都大学、広島大学、東京大学、岡山大学を含む19機関、56名である。

研究分担者（33名）

①気象グループ（竹見哲也、中村尚、高菰縁、万田敦昌、鈴木真一、田中健路、佐々浩司、中北英一、

高菰出）

②水文学・河川工学グループ（朝位孝二、前野詩朗、河原能久、王功輝、安田浩保、張浩、門田章宏）

③地盤工学・砂防学グループ（海堀正博、竹林洋史、土田孝、松四雄騎、森伸一郎、笹原克夫、八木浩司、佐藤剛、木村詩）

④防災情報・避難グループ（畑山満則、牛山素行、中野晋、矢守克也）

⑤災害歴史・災害リスクグループ（山本晴彦、田中貴宏、塚本俊明、村上ひとみ）

研究協力者（23名）

①気象グループ（小坂優、森正人、平野洪賓、山口弘誠、鈴木賢士、仲江川敏之、清野直子、今田由紀子、川瀬宏明、津口裕茂）

③地盤工学・砂防学グループ（長谷川祐治、山崎新太郎、千木良雅弘、原忠）

④防災情報・避難グループ（高木朗義、梶谷義雄、野島暢呂、小山真紀、湯浅恭史、武藤祐則、渥美公秀、竹之内健介、稲場圭信）



図1 研究内容および研究グループ間の連携体制

2. 各研究グループの研究計画と成果の概要

2.1 気象グループ

平成30年7月豪雨は、地球規模の大規模な大気・海洋場、台風や梅雨前線など総観規模の気象条件、豪雨を発生させた線状降水帯など積乱雲群活動に係わるメソスケールの気象条件や物理過程、豪雨をもたらした積乱雲内部の雲物理過程など、マルチスケールの大気・海洋現象が関与していると考えられる。また、平成最悪の犠牲者を出した風水害である今回の豪雨災害は、地球温暖化の影響が現れた予兆であることも懸念され、気候変動影響を評価することも必要不可欠であり、今後の防災・減災対策に資するために礎となる取組みが重要である。

本グループでは、大規模な大気循環異常の形成に関わるプロセス、西日本広域に降水システムが持続した大規模環境場要因、梅雨前線帯での線状降水帯形成に及ぼす海洋影響、総観規模の気象場の特徴と季節進行の影響、停滞性降水系が発達したメソスケールの大気環境条件と降水集中化のメカニズム解明、地上雨量観測やXバンドレーダーによる中国地方・四国地方といった地域別の大雨の実態の分析、国土交通省XRAINデータによる豪雨の構造の分析と周囲大気場の特徴に見られる気候変動影響評価、全球・領域気候モデルによる大規模アンサンブルデータによる豪雨発生の大規模循環場・メソスケール大気場に現れる気候変動影響の評価といった研究を実施した。大規模循環場から局地規模での気象場と線状降水帯について、客観解析データの解析、レーダーデータの解析、数値気象モデルによる再現実験等の手段により研究を進め、平成30年7月豪雨災害をもたらした大気場の特徴に及ぼす気候変動影響を分析した。さらに、将来の気候変動を見据えつつ、今後の豪雨防災・減災のために取り組むべき課題を提示した。

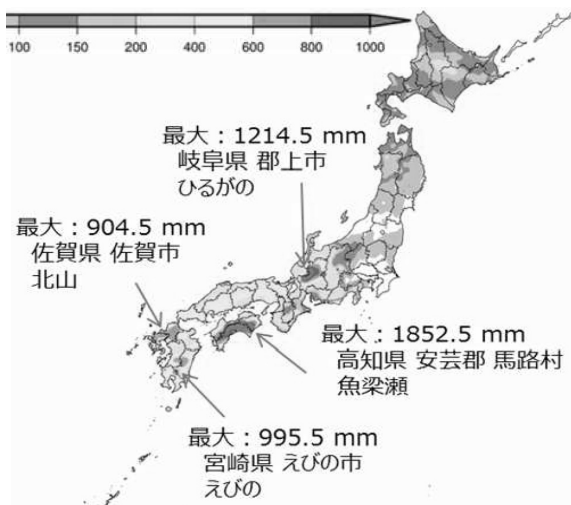


図2 AMeDASによる豪雨期間(2018年6月28日～7月8日)の総雨量(mm)分布

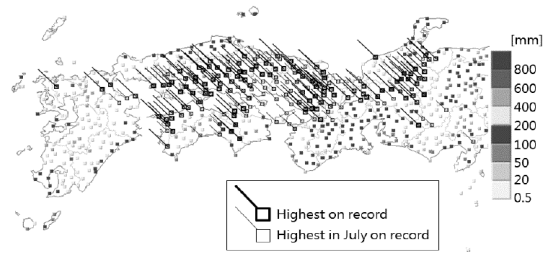


図3 豪雨期間の72時間最大降水量が過去35年のどの期間よりも多かったAMeDAS地点(濃い四角)及び7月上旬の記録を更新した地点(淡い四角)

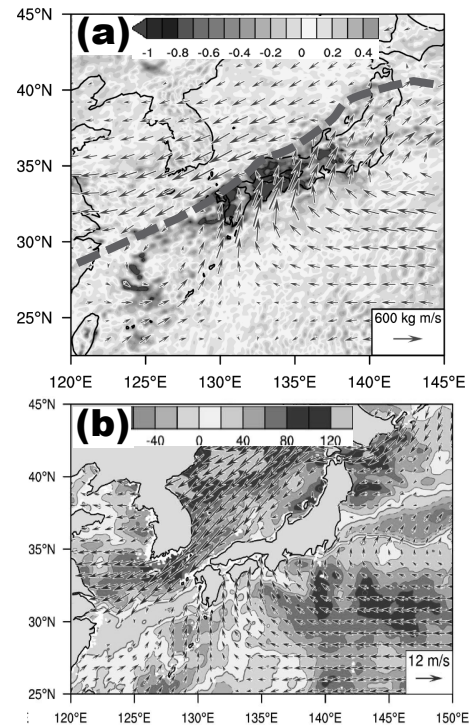


図4 MSMデータに基づく、豪雨ピーク期の(a)鉛直積算水蒸気flux偏差とその収束(青)・発散偏差(100mm/day), 及び(b)海上風偏差(矢印)と海面蒸発に伴う潜熱flux偏差(W/m^2 ; 正值は暖色). (a)の緑破線は梅雨前線の位置.

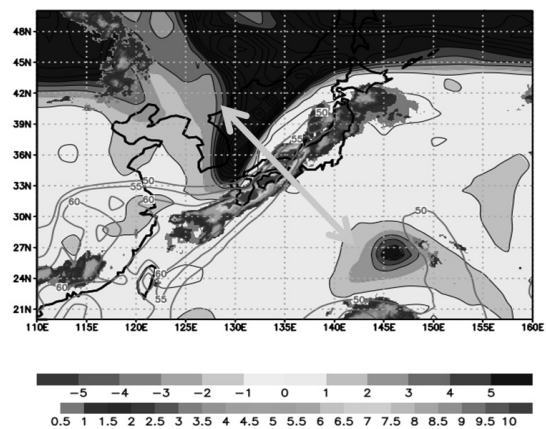


図5 2018年7月7日0 UTCのGSMaP降水量(虹色; $mm\ h^{-1}$), 可降水量(赤色コンター; mm), 350 K等温位面での渦位(赤-青色; PVU).

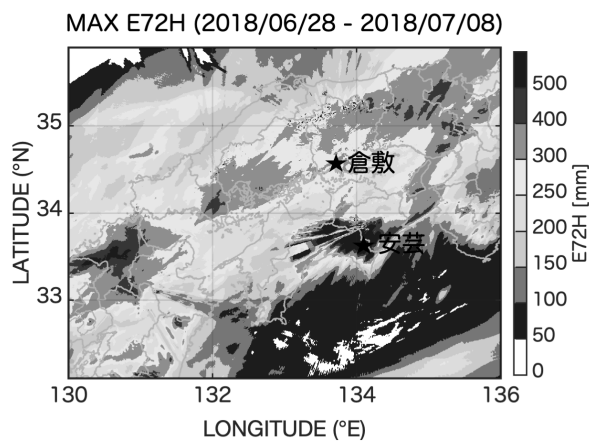


図6 72時間実効雨量の期間最大値

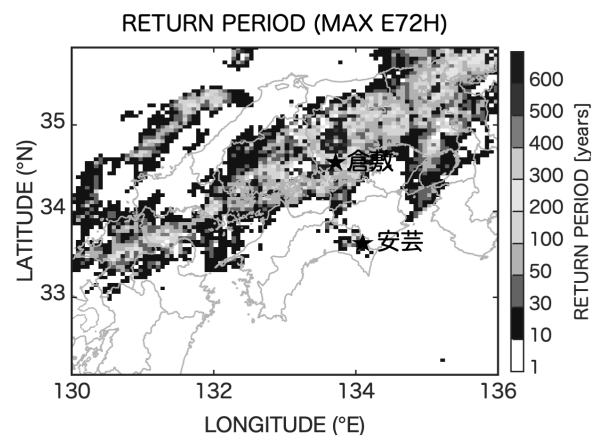


図7 72時間実効雨量期間最大値の再現期間

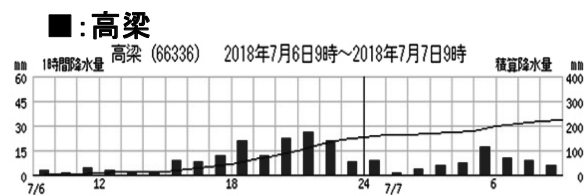
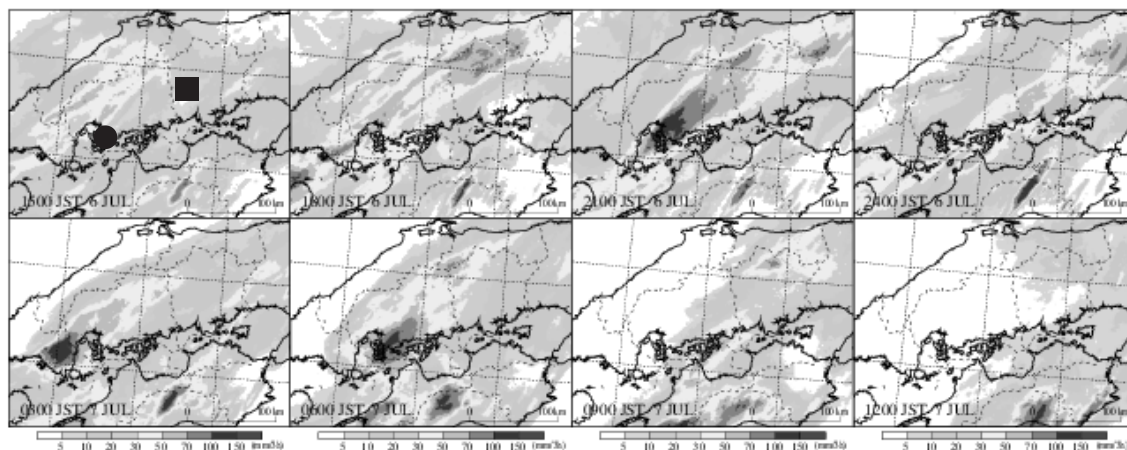


図8上：2018年7月6日15時から7日12時までの3時間積算降水量の分布。左下：広島県呉市の6日09時から7日09時までの降水量の時系列(棒グラフ：1時間降水量，線：積算降水量)。右下：左下図を同じ。ただし，岡山県高梁市。

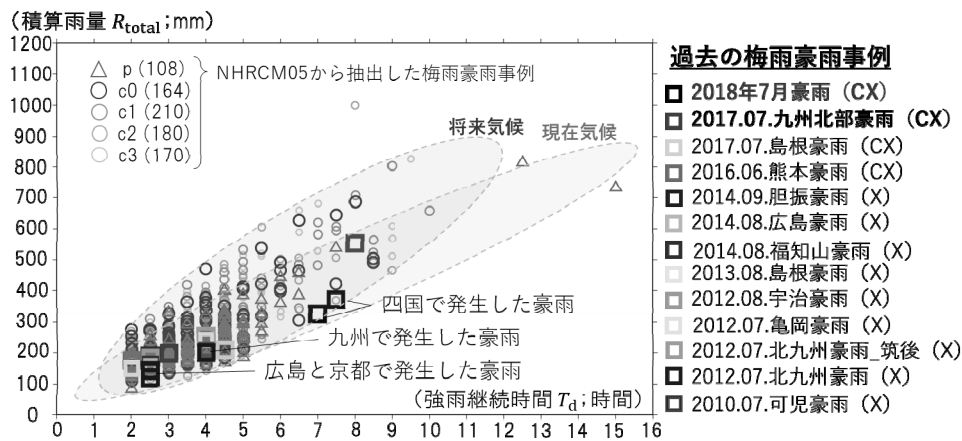


図9 強雨継続時間と積算雨量の将来変化

2.2 水文学・河川工学グループ

今回の豪雨災害は中国地方、四国地方にまたがる広域の大災害であった。本グループは水工学の立場から本豪雨災害について調査研究を実施した。紙面の都合上、その成果の一部を報告するものである。まず、広島県、岡山県、愛媛県および高知県における氾濫被害の調査研究結果を報告する。引き続き岡山県真備町で甚大な氾濫災害を引き起こした小田川の堤防破堤に関する調査結果を報告する。また小田川と高梁川合流部の樹林化と氾濫に関する研究結果を報告する。最後に人工衛星の衛星画像を用いた被災箇所抽出について報告する。各報告の概要を以下に記す。

広島県では7月5日から7日にかけて、広島県の東部から南部にかけて広範囲にわたって記録的豪雨に見舞われた。公共土木施設の3.284箇所が被災し、被害額570億円を記録している。広島県内の一級・二級水系の河川で多くの越水、溢水による氾濫が生じたが、氾濫した河川の流域の日雨量は200年確率以上と推定された。河道内樹木など通水能力が不足しているところで越水・溢水が見られた。また多くの流木や土砂が流れ込んだことも特徴的である。広島県内では、従来の豪雨災害の枠を超えて、ライフラインの面的な被害を通して、相乗的に広域化、長期化した。特に、整備水準が遅れていた中小河川では、流下能力不足による越水、溢水による氾濫、護岸の破損や排水不要による内水氾濫が多発した。改めて、河川の洪水流下能力の管理、堤防の維持管理などの確実な実行に対して、河川管理者に疑問が投げかけられた災害であった。

岡山県内では7月3日～7月8日にかけての総雨量は県内全域でほぼ300mmを超えた。雨量規模は3時間雨量で10～30年確率、24時間雨量で50年確率となり、岡山県では至上稀に見る大雨を記録した。倉敷市真備町を流れる小田川では3.4km左岸と6.4km左岸において洪水流の越水により堤防が決壊した。小田川の支川である末政川、高馬川、真谷川も決壊し真備地区全体の27%が浸水する大水害となった。最大浸水深は5.38mで小田川周辺では4mの箇所が多くあった。高梁川と小田川では合流部付け替えによる治水事業が計画されている。改修前の現況河道と改修後の計画河道を対象とした今次洪水の再現計算を実施した。現状では合流部で背水現象が発生し小田川の水位が上昇するが、改修後は背水現象が発生せず小田川の治水安全性に効果があることが示唆された。

愛媛県西部に位置している肱川は途中多くの支川を合わせながら伊予灘に注ぐ一級河川で、水が溜まりやすく捌けにくい流域になっている。梅雨前線や台風7号から変わった温帯低気圧の影響で7月4日22

時から7日14時までの肱川橋上流域の総雨量は367.4mmに達した。これにより肱川本川においても、大洲第二観測所の水位が既往最大の8.11mを記録し大規模な氾濫が発生した。大洲市東大洲地区では二線堤を越流するなど範囲に渡って被害が発生し浸水面積は462haとなった。大洲地区を対象に氾濫解析を行い浸水の流動形態を検討した。二線堤を越流した水はまず、都谷川付近の水田で浸水が始まり、その後、野田川に沿って徳森地区の方へ浸水が始まる。そして、国道56号線に沿って市街地の方へ浸水が始まるということが明らかになった。

高知県では6月28日18時から7月8日24時までの総降水量は、高知県馬路村魚梁瀬で全国一の1845.0mmを観測したほか、宿毛市、本山町、香美市と須崎市で日降水量、宿毛市、本山町、香美市、南国市、須崎市と四万十町で日最大1時間降水量の7月の1位を更新し、高知県では初めてとなる大雨特別警報を気象庁が発表された。安芸川は土佐湾に注ぐ高知県東部の二級河川である。7月6日午前4時頃、大雨により安芸川の流量増加に伴い、安芸市柵ノ木地点では最高水位が3.95mを記録し、氾濫危険水位を95cm超過、既往最高である平成16年の2.99mを更新した。宿毛市において氾濫メカニズムを検討した結果、流下能力不足、水門やポンプの機能不全、背水現象による自然流下不能に分類された。

岡山県倉敷市真備町では小田川とその支川（末政川、高馬川、真谷川）において8か所の決壊および数か所の法崩れが発生した。堤防の被災箇所を踏査し、高精度表面波探査及び高密度電気探査を実施して調べた。今回の河川堤防の決壊の原因は越流破堤によるものが支配的であると指摘されているが、本調査により河川水位の上昇及び堤体への漏水によって、堤体の川裏法面において、すべり的な崩壊が発生していることが分かった。これにより越流が発生するまでに、堤体敷の幅が大きく浸食され、その後の越流の発生によって堤体がより急速に浸食されると推察された。

小田川と高梁川の合流点の改修事業は、小田川の下流区間の洪水時の水位低下に加え、低速流の解消により土砂輸送能力の向上も同時に見込める。そこで樹林繁茂に及ぼす影響の把握を目的として、主に河床面の移動速度とその時の力学的な平衡状態の両者から河床材料の新陳代謝の活性度の推定を試みた。その結果、同改修事業による洪水時の水位低下は河床材料の新陳代謝を活性化させ、樹林繁茂の緩和への寄与が期待できることが分かった。

日本国内では、発災後短時間で被災地の画像を取得し、被害状況や二次災害の危険状況の把握を可能とすることを目的として、Lバンド合成開口レーダー

「PALSAR-2」を搭載した陸域観測技術衛星2号「だいち2号」(ALOS-2)が運用されている。本研究では合成開口レーダー画像を用いて西日本豪雨水害の被災箇所(岡山県倉敷市真備町, 広島県広島市東部, 東広島市, 呉市, 山口県周南市, 岩国市)で被災箇所の抽出を過食混合法で試みた。真備町は浸水域をそれ以外は斜面崩壊を対象とした。比較的スケールが大きい斜面崩壊は抽出可能であった。真備町は広域の浸水であったため抽出が可能であった。また浸水域とDEMデータから浸水深を推定した。その結果, 実測比較して10cm程度の誤差であった,

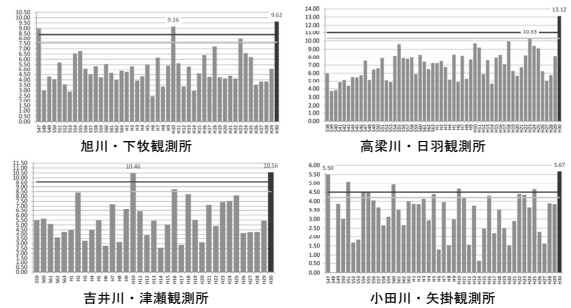


図 11 各観測所における年間最高水位の経年変化

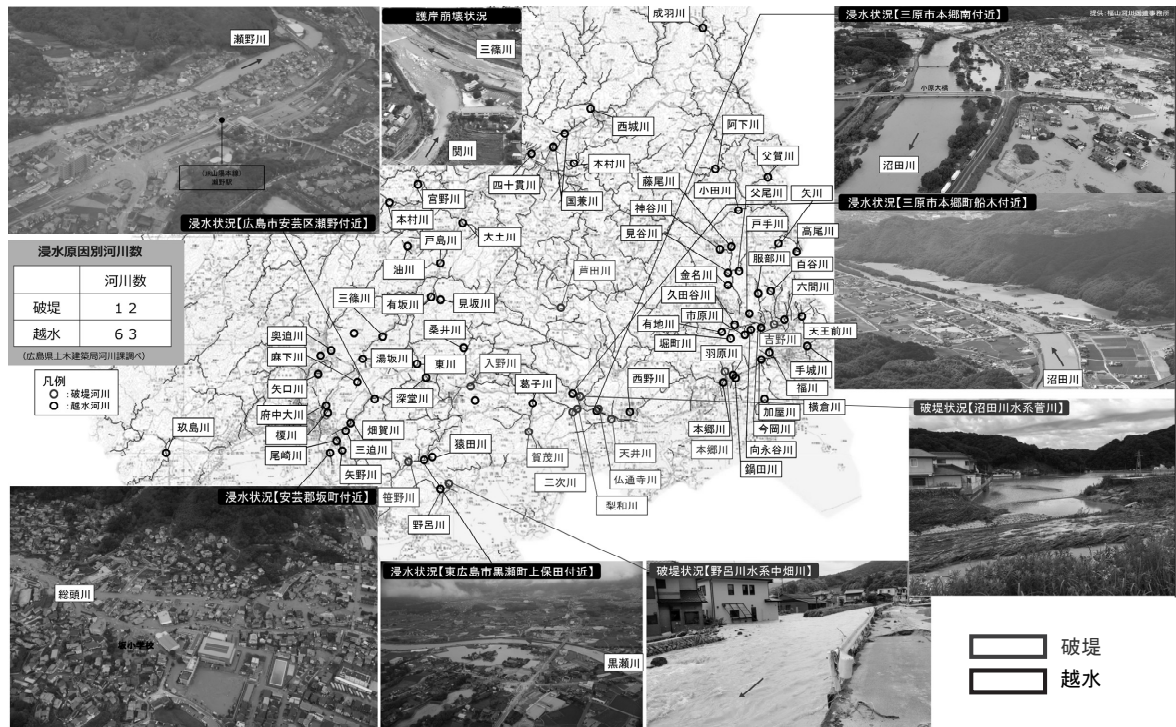


図 10 広島県管理河川の被災状況 (広島県, 2018)



図 12 岡山県倉敷市真備地区における浸水深分布 (水工学委員会・合同調査結果)

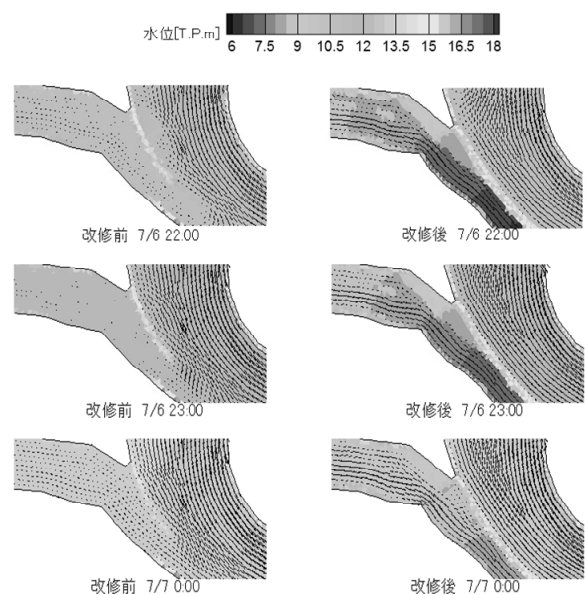


図 13 小田川・高梁川合流部の付け替え工事(改修)の前後の河道における今次洪水の解析結果の比

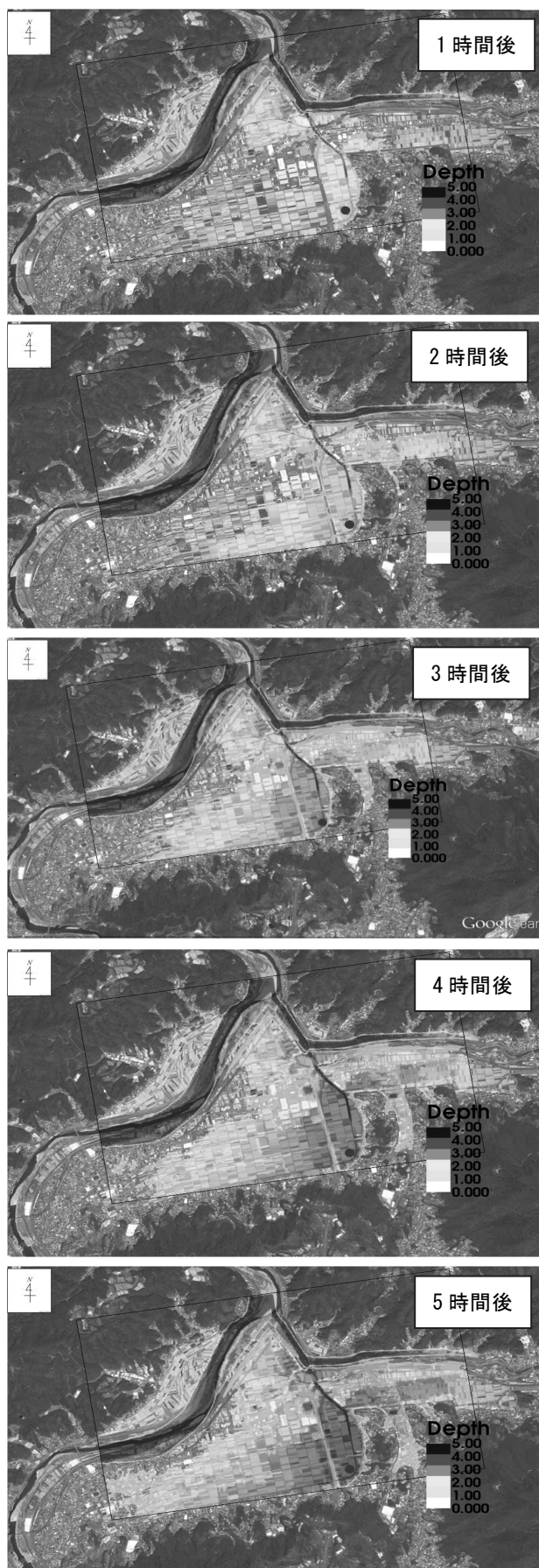


図 14 東大洲地区付近における氾濫解析の結果

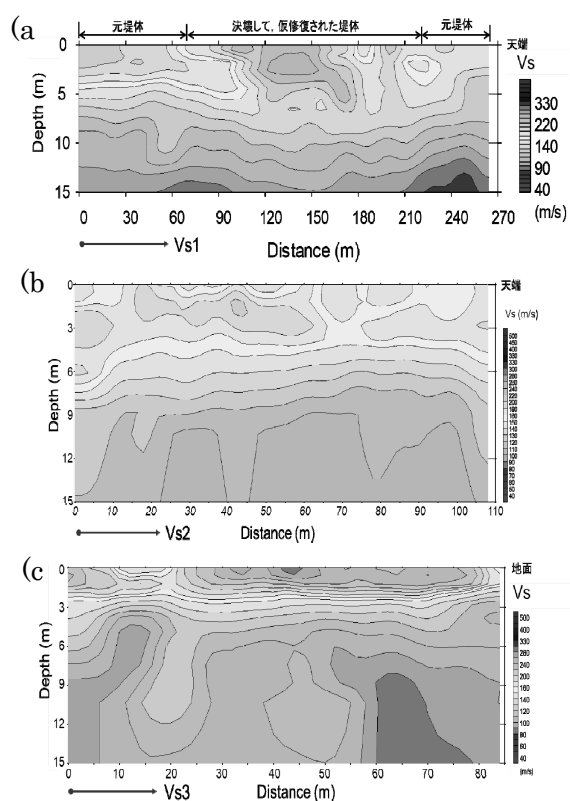


図 15 末政川 0.7k 区域における測線に沿って実施した高精度表面波探査の結果

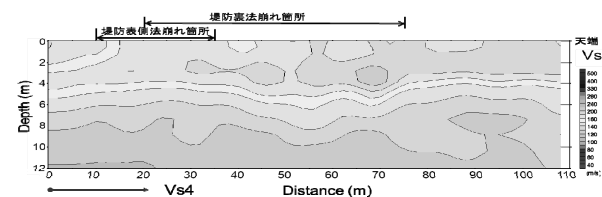


図 16 末政川 0.4k 区域の右岸の堤防における高精度表面波探査の結果

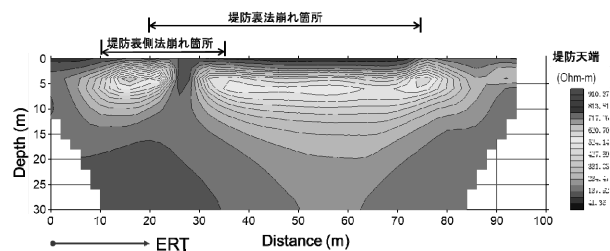


図 17 末政川 0.4k 区域の右岸の堤防における比抵抗分布図

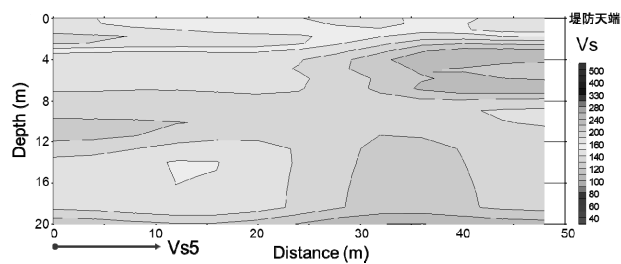


図 18 小田川左岸堤防における高精度表面波探査の結果

2.3 地盤工学・砂防学グループ

2018（平成30）年7月6日と7日に広島、高知、愛媛などを中心に長時間雨が降り続けるとともに、南西から北東方向に線状降水帯が形成され、降雨強度の強い雨が観測された。その結果、非常に多くの斜面崩壊および土石流が発生し、甚大な被害が発生した。広島県では、降雨が数日間継続し、かつ累加雨量が特に多かったことなどから、これまでの崩壊や土石流以上に流動性の高い洪水流なども目立ち、広い範囲で居住エリアに被害をもたらした。また、道路、水道、鉄道など様々なインフラ施設が土石流により甚大な被害を受けた。特に、広島市安芸区県道34号線で発生した道路利用者に対する土石流災害については今後の研究と対策が必要である。さらに、土石流の数値シミュレーションにより、広島県熊野町や広島市安芸区で発生した土石流の氾濫特性が明らかとなった。広島地域の花崗岩と流紋岩を基盤とする山地では、地形変化に効果的な時間スケールにおける降水量が増えて表層崩壊が発生する閾値が約80mm/3hであると推定された。また、広島市・坂町・呉市周辺の空中写真をもとに、崩壊・土石流の分布図を作成し、発生場の地形・地質的背景も検討した。高知県長岡郡大豊町立川流域では大規模崩壊が発生したが、降雨パターンが深層崩壊をもたらすものとは異なることが明らかとなった。

愛媛県内では、南予地方の宇和島市吉田町、中予地方の松山市、東予地方西部に位置する今治市島嶼部で土砂災害が集中した。これは、平年の降雨が少ないところに連続して多量の降雨があったためである。また、愛媛県宇和島市周辺の岩盤崩壊について現地調査を実施し、岩盤崩壊の特徴について明らかとなったとともに、瀬戸内海沿岸・松山市島嶼部の興居島で発生した崩壊・土石流に対して、衛星画像から崩壊分布図を作成し、その分布特性を把握した。さらに、宇和島市・西予市にまたがる法華津峠・法華津湾周辺の山地斜面について、空中写真判読を行い斜面災害の分布とタイプを明らかにするとともに、斜面災害タイプごとの地形・地質的背景を検討した。また、愛媛県南予地方で発生した崩壊地の分布密度や崩壊面積率と地質・地形・植生および雨量分布との関係を解析した。その結果、四万十帯砂岩の分布域で崩壊地の分布密度や崩壊面積率がきわめて高くなっており、それには、急斜面の割合と「果樹園」として利用されている土地の広がりが大きく影響していたことを定量的に示すことができた。県内最多の斜面崩壊のあった宇和島市では、吉田町に集中していた。表層崩壊が主ではあったが、深層崩壊が多く見られ、犠牲者を出したものの多くが斜面崩壊のほとんどが深層崩壊であった。

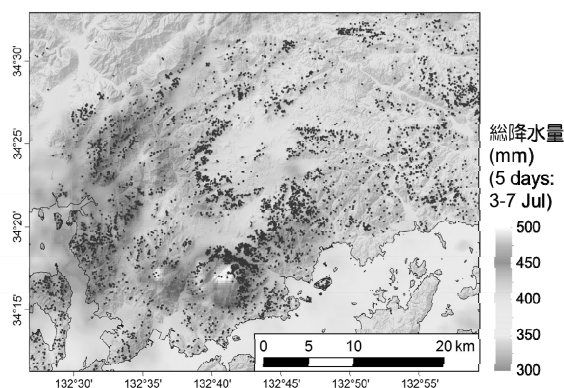


図19 広島における総降水量（背景色）と崩壊源（赤点）の分布

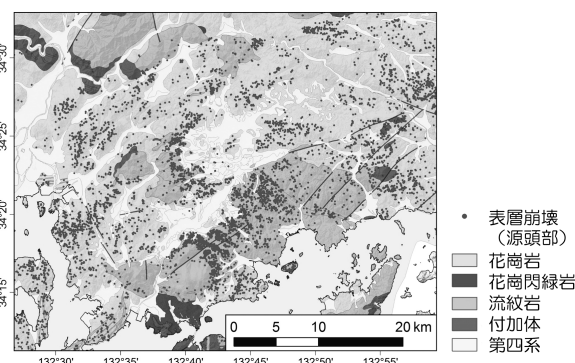


図20 地質（背景色）と崩壊源（赤点）の分布

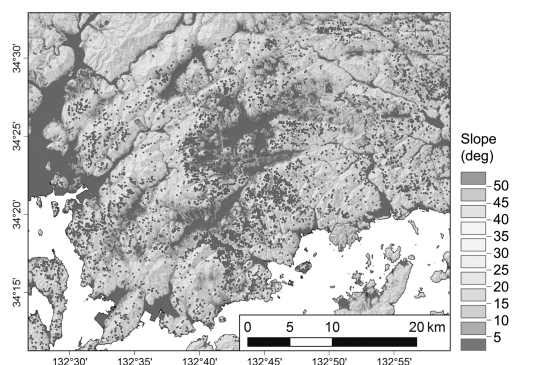


図21 地形（斜面傾斜：背景色）と崩壊源（赤点）の分布

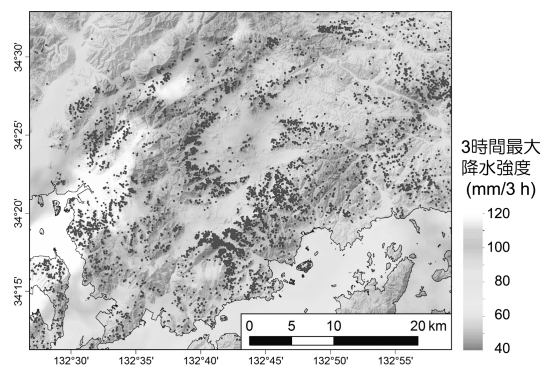


図22 3時間最大降水量（背景色）と崩壊源（赤点）の分布

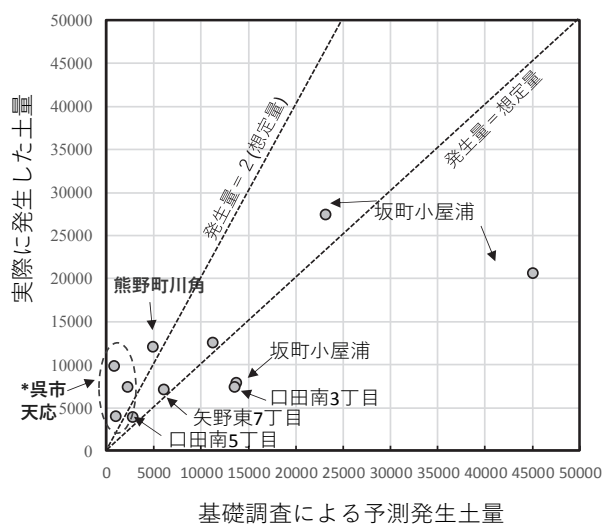


図 23 土石流の発生土量と基礎調査で想定されていた土量の関係

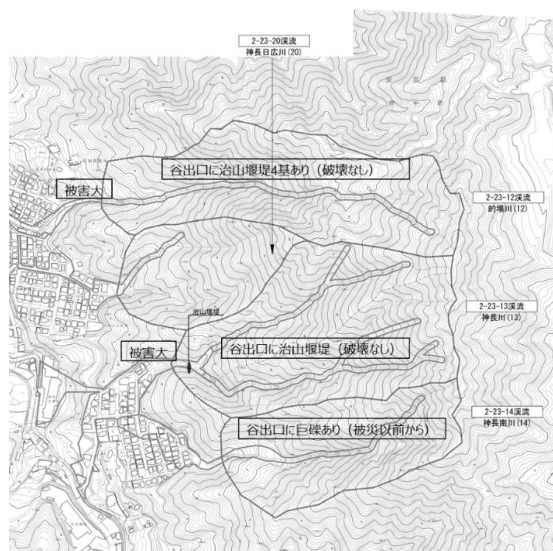


図 24 シミュレーションの対象流域
(広島市安芸区矢野東7丁目)



図 25 溪流 13 についてのシミュレーション Run4-1 の結果
(左: 土砂堆積, 右: 最大痕跡)

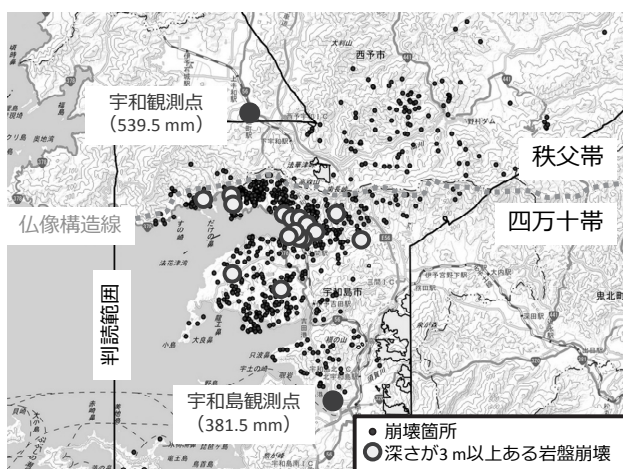


図 26 国土地理院による平成 30 年 7 月豪雨の崩壊 影 (千木良雅弘氏提供)
地等分布図と気象観測点位置 (7 月 5-8 日の総雨量)・地質帯および境界の関係



写真 1 発生直後の斜め空中写真（航空機から撮影（千木良雅弘氏提供））

2.4 防災情報・避難グループ

平成30年7月豪雨では、西日本の広範囲に河川氾濫・土砂災害を引き起こし、200名以上の死者・行方不明者を生み出す結果となった。本研究では、被害の大きかった広島、岡山、愛媛、岐阜、京都を中心に避難情報の発表と被災地域住民の行動（犠牲となった人々の行動や病院や要支援者入居施設における避難支援行動を含む）について調査を行い、下記の成果を得た。

「第1章 被災者行動」と情報においては、Web調査により避難した人の特徴が分析された。分析結果から、避難指示（緊急）が最も切迫した避難情報であることは浸透していたが、それ以前の避難勧告、避難準備高齢者避難開始は避難行動に十分に結びついていないと考えられる。避難情報に関しては、さらに細分化をする動きもあるが、これにより最も切迫したレベルをより危険側に新しく作ることは慎重に行うべきであるといえよう。避難に連動する個人の防災意識については、多重な情報源を持つこと、平常時の防災活動への参加経験が関連している。これらは、地域ぐるみでの活動があれば、より積極的な避難につながることも示唆されている。

「第2章 人的被害の特徴」においては、以下の結果が得られた。

- ・平成30年7月豪雨による直接死者数及び行方不明者数は計230人で、これは昭和57(1982)年7月豪雨以降の風水害として最大の犠牲者数である。ただし、過去には同規模以上の人的被害を生じた風水害事例は多数発生している。一方家屋被害は極端に大きくなく、家屋被害に対し人的被害が大きい事例である。

- ・「土砂」による犠牲者が6割と最も多く、これは近年の風水害と同傾向だが、「洪水」が3割以上と多かったことも特徴である。

- ・「屋内」の犠牲者が6割以上で、これは近年の風水害に比べ高い比率である。

- ・なんらかの「避難行動あり」の犠牲者率は1割強で、近年の風水害と同程度だが、人数で見ると27人以上で、1999年以降の風水害として最多となった。

- ・「土砂」犠牲者の9割が土砂災害危険箇所付近で発生し、これは近年の風水害と同傾向である。

- ・洪水「河川」犠牲者は6割が浸水想定区域付近で発生し、この比率は近年の風水害よりかなり高い。倉敷市など、浸水想定区域指定作業が進んでいる大河流域で多くの犠牲者が生じたためと思われる。

- ・「洪水」「河川」の9割以上が地形的に洪水の可能性がある「低地」で発生し、これは近年の風水害と同傾向である。地形情報をハザードマップの補助的情報として活用することの重要性があらためて示唆された。

- ・犠牲者の発生時間帯は夜間が7割以上で、近年の風水害に比べ高かった。ただし18～24時が特に多く、いわゆる「寝込みを襲われた」タイプではない。

これらの調査結果から本事例は、近年の風水害としては特筆される大規模な人的被害が生じたことが大きな特徴と言える。一方で、本事例で見られた被害形態の多くは近年の風水害で繰り返し生じているものと言ってよい。倉敷市で顕在化した、「非流失家屋の屋内で多数の死者が発生」という形態は、家屋が流失しにくくなった現代ならではの被害形態とも言えるが、発生した場所はすべて浸水想定区域内で、浸水規模も想定範囲内である。思いもよらない災害が発生したとは言えない。既に整備されている様々な災害情報を活用していくことがさらに重要になっていると考えられる。

「第3章 要配慮者利用施設等の緊急対応に関する課題」においては、高齢者、乳幼児、入院患者等の災害時要配慮者の利用施設の緊急対応に関する調査と一般住民による水害情報の活用状況調査の結果が示された。前者では、愛媛県と岡山県の施設を対象に現地踏査とヒアリング調査を行い、避難行動を起こす上で必要な情報とタイミングについて分析し、施設によっては浸水危険性浸水が始まるぎりぎりまで把握できず、切迫避難となったケースも確認された。一方、過去にも浸水被害を受けた経験を持つ施設では施設管理者が周辺河川の水位情報や上流側の浸水状況をモニターして避難判断をしていた事例もあった。平時から施設の危険性を認識し、避難判断に必要な情報と基準を設定していることが重要であることが再確認できた。また、後者の市民対象の水害情報活用に関するアンケート調査では、情報の種別とその意味を十分理解できていない方が多いことが明らかになった。情報の種別をたびたび改定するのではなく、情報内容の正しい周知活動が必要である。

「第4章 西日本豪雨における避難行動と被災地支援」では、まず、豪雨災害事例の分類モデルとして、「致命的な、破壊的な(F)」、「偶発的、不慮の(A)」、「死活的な、決定的な(C)」、「潜在的な、陰に隠れた(P)」を要素とするFACPモデルを提示するとともに、その考え方を実際の豪雨災害に適用する必要性を述べている。また本豪雨災害におけるC事例を収集し、C事例において地域や組織の連携・過去の災害経験などが関係している可能性について言及した。本豪雨災害においてP事例に該当した京都市伏見区下鳥羽地区を対象とした住民意識調査の結果からは、災害ポテンシャルの認識が高い一方で、P事例であったことを指摘することにより、住民の中で自己反省が促される可能性も確認された。

岡山県倉敷市真備町および矢掛町における初期対応に関する聞き取り調査の結果からは、足が不自由であったため避難勧告等を聞いていても避難しなかった事例もあれば、避難したけれども避難先で十分な対応が得られていない事例、また、救援に関する情報に偏りがあって災害ボランティアを含む救援が早期になされなかった事例、さらには、真備町川辺地区の寺院には明治時代の水害による被害を記した供養塔があり、教育委員会が災害の伝承のために説明プレートを設置していたにもかかわらず、近隣の人たちの中には早期の避難行動を取らないものも多数いたことが分かった。

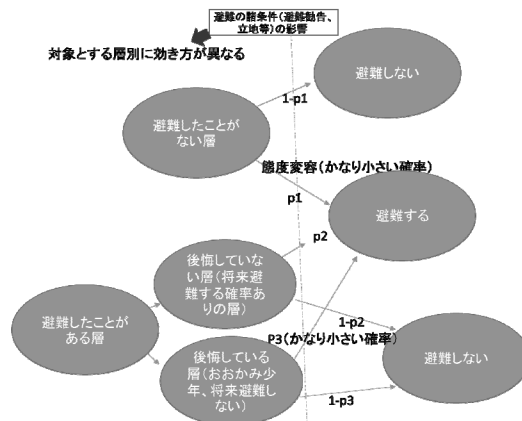


図 27 調査票の設計コンセプト

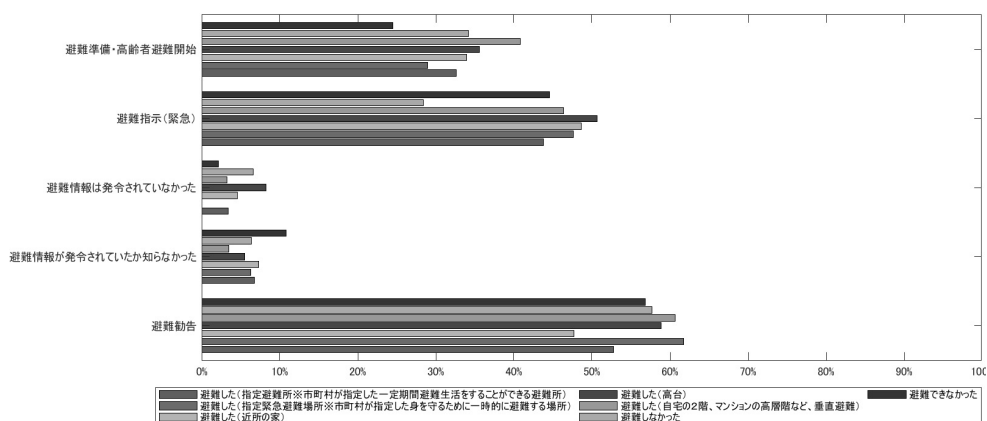


図 28 避難行動と避難情報の関係

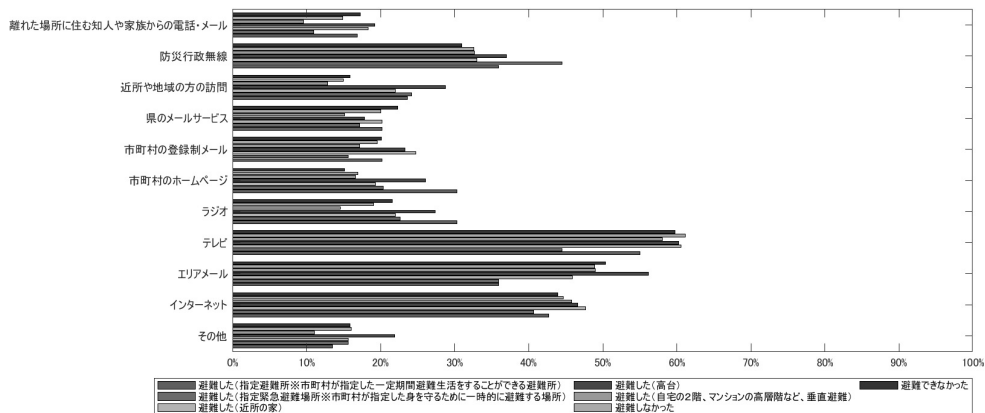


図 29 避難行動と情報源の関係

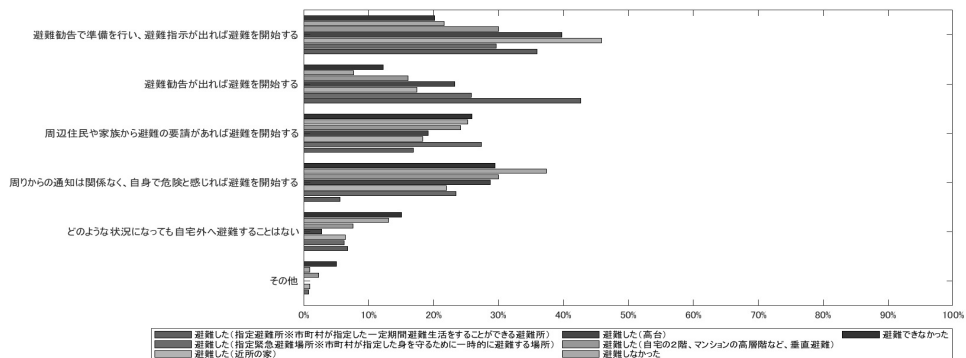


図 30 避難行動と次の災害時の避難開始のタイミング

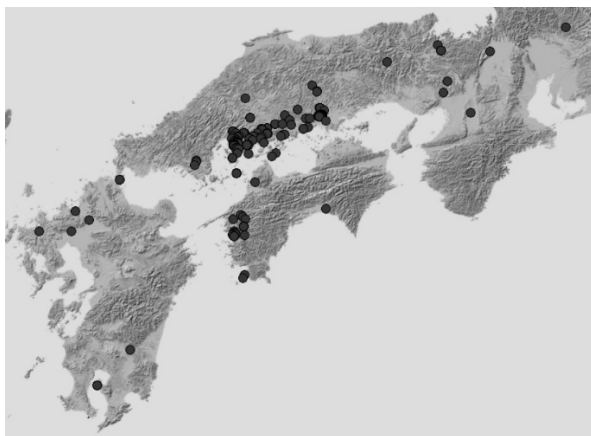


図 31 死者・行方不明者の発生場所（背景は地理院地図(陰影起伏図)）

原因外力

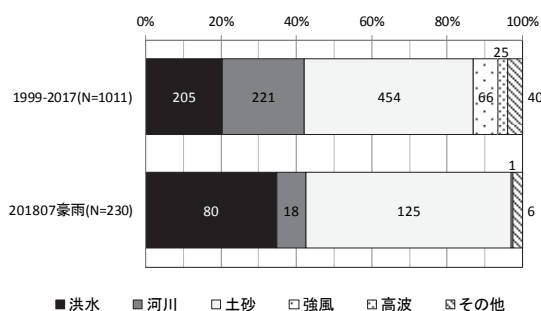


図 33 原因外力別犠牲者数

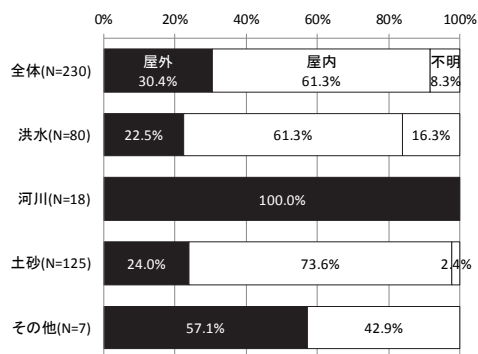


図 34 外力別犠牲者の遭難場所(2018/07 豪雨)

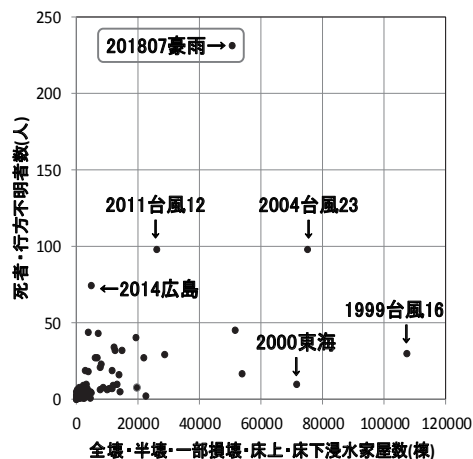
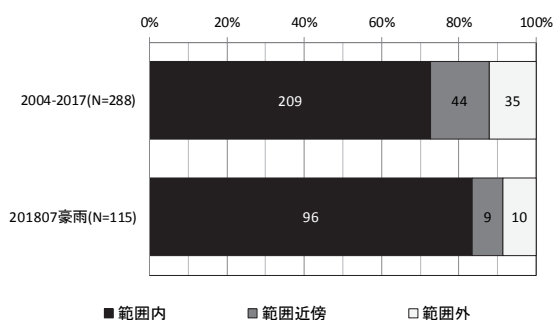


図 32 1999 年以降の豪雨災害における犠牲者数と被害家屋数の関係

土砂災害危険箇所



浸水想定区域

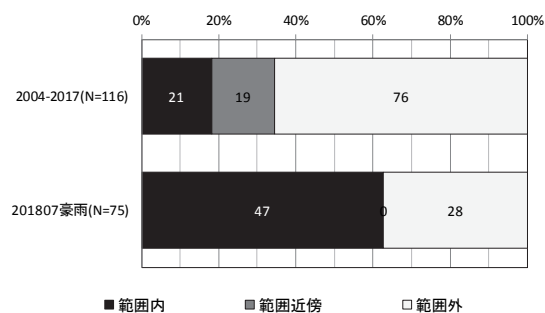


図 35 土砂災害危険箇所・浸水想定区域と犠牲者発生場所の関係

表 1 各施設の避難行動の比較

災害の名称	西日本豪雨災害			
発生日	2018年7月			
河川	小田川	肱川(下流)	肱川(中流)	肱川(上流)
場所	岡山県倉敷市	愛媛県大洲市	愛媛県大洲市	愛媛県西予市
施設	特別養護老人ホームA	特別養護老人ホームB	介護老人保健施設C	グループホームD
階数	平屋	2階建て	5階建て	2階建て
水害想定マニュアル	なし	あり	あり	なし
水害想定避難訓練	なし	あり	一部あり	一部あり
水位情報	確認	確認	確認	確認
避難行動開始の目安	あり(避難勧告)	なし	あり(水位・ダム)	なし
実際に避難したタイミング	避難勧告	避難指示の後	—	避難指示
入所者の避難先	水平避難(系列施設)	垂直避難(2階)	—	水平避難(系列病院)
避難誘導	応援あり	自力	—	自力
避難時の状況	迅速	切迫	迅速	切迫

2.5 災害歴史・災害リスクグループ

岡山県倉敷市の真備町は、1687（貞享4）年の洪水を始め、1852（嘉永5）年まで、矢田川（現在の小田川）と高梁川の氾濫による大洪水は13回を数え、浸水深も1丈7.8尺（約5.5m）に達することが度々あり、今回の洪水による最大浸水深は著者らの現地調査から5.9mであることから、この規模の洪水が頻繁に発生していた「水害常襲地」であったことがわかる。江戸時代に交通の要衝であった川辺宿を守るため、「神楽土手」と呼ばれる土塁の内堤を川辺宿の周囲にめぐらし、明治26年の大洪水で決壊し、川辺の町が壊滅的な被害を蒙るまで、川辺宿を何とか洪水から守っていた。小田川北岸の水害リスクが高い低平地は水田が広がり、1925（昭和元）年や1965（昭和40）年でも住家が徐々に増えているものの、大きな変化は見られない。しかし、農地転用の面積が1970（昭和45）年には26.3ha、同49年が22.5ha、同50年が11.2haとわずか3か年で60haと急増し、人口は、1965（昭和40）年に13,225人であったものが、1980（昭和55）年には20,899人と7,000人強も増加しており、高度経済成長期における戸建て需要の増大により農地を宅地に転用して、住宅建設、「新住民」の転入によって人口が増加していた。現地での浸水痕跡調査から、これらの低平地の農地を転用した宅地では3～6m弱の浸水被害に見舞われており、旧真備町役場（現在の真備支所）、玉島消防署真備分署、真備図書館、倉敷まきび支援学校などの公共機関も甚大な浸水被害が生じていた。公助としての役割を担う公共施設において被災後の復旧が大きく遅れ、住民等への対応に大きな支障をきたす結果となった。

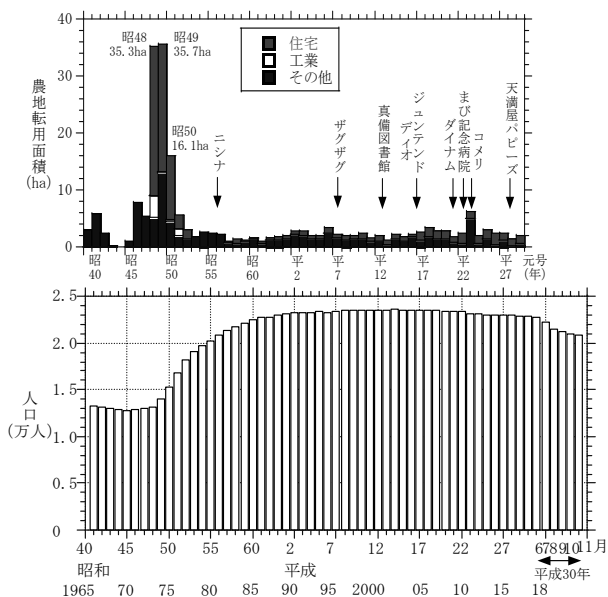


図 36 真備町における人口と農地転用面積（ha）の推移



写真 2 真備公民館川辺分館の駐車場脇に現存する「神楽土手」

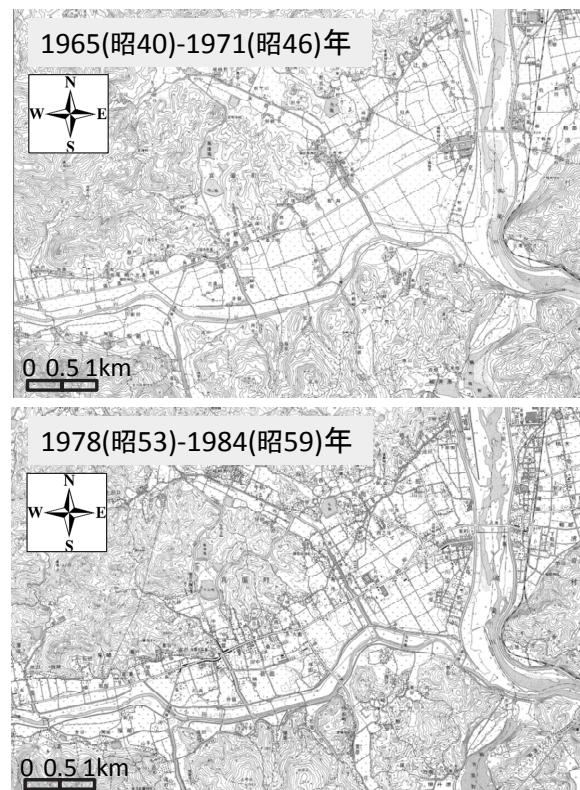


図 37 地形図で見る土地利用の変遷



図 38 真備町川辺地区における農地転用の変遷

平成30年7月豪雨により、多くの土砂災害および河川災害が発生した呉市を対象とし、市街化履歴と災害リスクの関連分析および将来土地利用の検討した。土砂災害危険箇所図と建物GISデータを見ると、対象地内に土砂災害危険箇所内の建物は約30,000存在し、この中で今回の土砂流出エリア内の建物数は約1,000であった。また、土砂災害警戒区域、土砂災害特別警戒区域も広範に広がっていた。このことから、今後の豪雨災害による被災リスクを抱える建物は、未だ多く存在すると言える。土砂災害については、昭和45年以前の宅地の被害が大きいため、戦前もしくは高度経済成長期に開発された山麓部の宅地にて、特に注意が必要と考えられる。また、山麓部の市街地の一部は道路等のインフラが未発達な地区もあり、市街地集約化の必要性が指摘されている対象地において、これらのエリアの今後の土地利用は縮退も含めた検討が必要と考えられる。河川氾濫については、1990年以降に開発された宅地でも被害が多く見られた。特に安浦地区に見られるような、農地転用がなされて開発された宅地では特に必要と考えられる。これらのエリアでは、土地区画整理等がなされ、道路等のインフラも整備されていることから、今後の人口動態も鑑みながら、住宅以外の用途建物の誘致も含めた、土地利用の検討が必要と考えられる。

岡山県倉敷市の真備町川辺地区・有井地区にて避難に関するアンケート調査を実施し、川辺454件、有井229件の回答を集計分析した。避難率は川辺で60%、有井で51%であったが、避難時の浸水状況として川辺で25%、有井で34%がくるぶし以上と回答しており、危険な状況の中での避難が多々あった。防災行政無線が使われていたが雨音が激しく、放送内容を知ることが困難であった。そのため住民は家族や近隣からの呼びかけ、テレビ・ラジオ、エリアメール等で危険を知り避難を始めた。避難の交通手段は川辺で92%、有井で78%が自動車によるもので、洪水の心配がある中での避難としては危険なものであったといえる。有井では避難が夜中から未明に起こり、より危険な状況の避難となり、救助も困難だった。避難に支援が必要な者がいるケースについて、家族人数が1~2人の方が3人以上に比べて、より避難率が低かった。ハザードマップの内容を理解していた人は川辺で25%、有井で20%と少なく、住宅購入、建設時に説明を受けたことがある人も4%とごく少数であった。洪水が心配される土地であったにもかかわらず、説明されていない現状には問題があるといえる。

表 2 呉市における区域区分の変遷

決定及び変更年月日	決定及び変更の内容	市街化区域面積 (ha)	市街化調整区域面積 (ha)
昭和 46年 3月12日	決定 広島県告示第259号	3,263	11,067
48年 12月28日	軽微な変更 広島県告示第1009号	3,383	11,049
54年 6月19日	第1回総合見直し 広島県告示第504号	3,221	11,223
62年 3月2日	第2回総合見直し 広島県告示第184号	3,222	11,248
平成 元年 4月6日	特定保留解除 広島県告示第472号	3,261	11,210
7年 10月30日	第3回総合見直し 広島県告示第1133号	3,412	11,138
12年 9月21日	特定保留解除 広島県告示第7876号	3,426	11,134
16年 5月31日	第4回総合見直し 広島県告示第791号	3,575	11,047
24年 5月31日	第5回総合見直し 広島県告示第519号	3,576	11,046

表 3 土砂流出エリア内と河川氾濫エリア内の宅地開発年代別建物数

土砂流出		河川氾濫	
年代	被害建物棟数 (棟)	年代	被害建物棟数 (棟)
昭和23年以前	1103	昭和23年以前	504
昭和23年～昭和36年	73	昭和23年～昭和36年	101
昭和36年～昭和45年	188	昭和36年～昭和45年	239
昭和45年～昭和56年	403	昭和45年～昭和56年	98
昭和56年～平成3年	124	昭和56年～平成2年	9
平成 3年～平成12年	89	平成 2年～平成12年	24
平成12年～平成21年	20	平成12年～平成18年	53
平成21年以降	1		
不明	2		
計	2003	計	1028

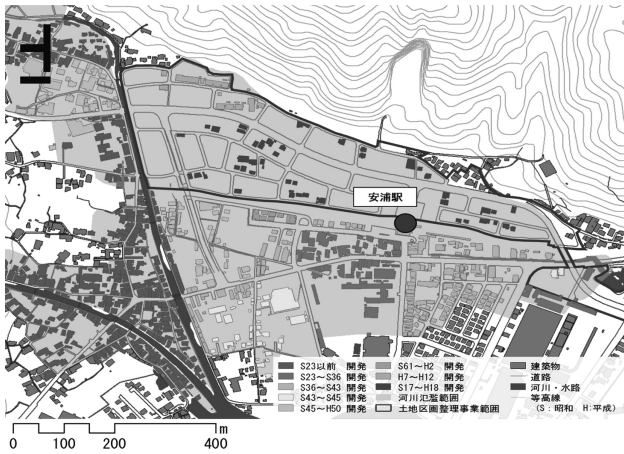


図 39 河川氾濫エリアと宅地開発時期の重ね合わせ (安浦地区)

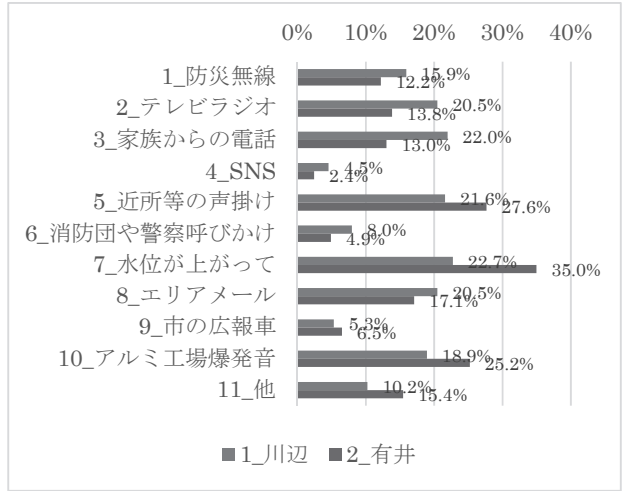


図 40 避難のきっかけ (問 12, MR, 3 つまで)

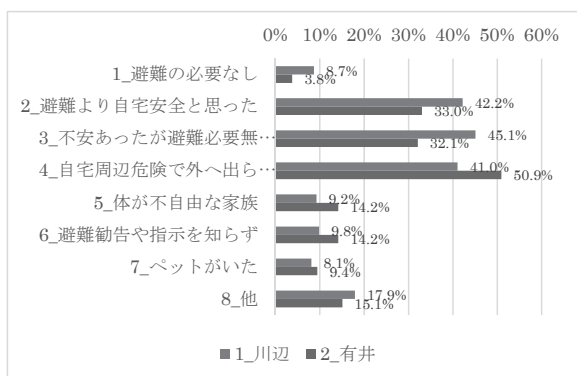


図 41 避難しなかった理由 (問 18, MR, 3 つまで)

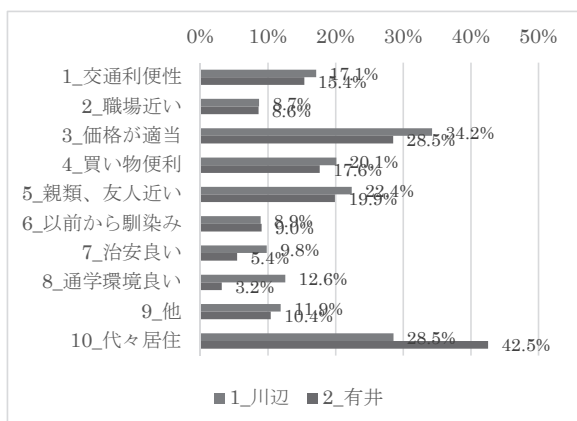


図 42 真備に住むことを決めた理由 (問 23, MR)

3 おわりに

「平成30年7月豪雨」について、①気象、②水文学・河川工学、③地盤工学・砂防学、④防災情報・避難、⑤災害歴史・災害リスクの5つ調査研究グループを構成して、①数日にわたり広域的な豪雨を継続させた線状降水帯の発生解明、②大規模な洪水災害を引き起こしたメカニズムの解明、③多発した土砂災害におけるメカニズムの解明、④防災情報の住民への伝達と避難の実態解明、⑥都市開発の歴史と災害リスクの変遷に焦点を絞り、得られた研究成果の一部について報告した。

なお、これらの成果は参考文献にも示したが、これ以外にも多くの研究成果があるが、紙面の制約上、割愛している。

謝 辞

本研究は、平成30年度科学研究費補助金特別研究促進費「平成30年7月豪雨による災害の総合研究」(研

究代表者：山本晴彦、課題番号：18K19951)により実施されたものである。交付に当たっては、文部科学省研究開発局地震・防災研究課と自然災害研究協議会の関係者の方々にご尽力を賜った。本研究の実施に際しては、関係機関から各種の気象・河川水位データ、国土数値データ、被害資料等の提供を受けるとともに、被害調査やアンケート調査等では被災地の方々に多大なご協力を頂いた。ここに厚く謝意を表します。

なお、本稿は平成31年3月20日に発行した『平成30年7月豪雨による災害の総合研究 報告書』、同月27日に広島市の中国新聞ホールで開催したオープンフォーラム（成果報告会）での資料に基づいて作成したものである。

最後に、平成30年7月豪雨でお亡くなりになられた多くの方々のご冥福をお祈り申し上げるとともに、被災された方々に心からお見舞いを申し上げます。

参考文献

- (1) 山本晴彦 他5名：2018年7月豪雨により倉敷市真備町で発生した洪水災害と土地利用の変遷，自然災害科学，38(2)，印刷中，2019.
- (2) 山本晴彦 他5名：2018年7月豪雨により広島県で発生した土砂災害と土地利用の変遷，自然災害科学，38(2)，印刷中，2019.
- (3) 山本晴彦 他7名：2018年7月豪雨により山口県東部で発生した洪水・土砂災害の特徴，自然災害科学，38(2)，印刷中，2019.
- (4) 海堀正博 他18名：平成30年7月豪雨により広島県で発生した土砂災害，砂防学会誌，71(4)，49-60，2019.
- (5) 佐藤剛 他4名：平成30年7月豪雨によって発生した愛媛県興居島の崩壊分布と土砂移動プロセス，日本地すべり学会誌，56(3)，p. 129-134，2019.
- (6) 笹原克夫 他14名：平成30年7月豪雨によって四国地方で発生した土砂災害，砂防学会誌，71(5)，p. 43-53，2019.

平成30年北海道胆振東部地震とその災害に関する総合調査

高橋浩晃¹・勝俣 啓¹・大園真子¹・橋本武志¹・青山 裕¹・酒井慎一²・松本 聡³
岡田知己⁴・小菅正裕⁵・寺川寿子⁶・飯尾能久⁷・中尾 茂⁸・上嶋 誠²・柴田智郎⁹
大津 直¹⁰・高井伸雄¹¹・飯場正紀¹¹・渡部要一¹¹・菊地 優¹¹・岡崎太一郎¹¹
白井和貴¹¹・西村裕一¹・石川達也¹²・高瀬裕也¹³・永井 宏¹³・宮森保紀¹⁴
三宅弘恵¹⁵・松島信一⁷・浅野公之⁷・重藤迪子¹⁶・卜部厚志¹⁷・前田宜浩¹⁸
石澤友浩¹⁹・廣瀬 亘¹⁰・小山内信智²⁰・山田 孝²⁰・笠井美青²⁰・檜垣大助²¹
風間基樹²²・千木良雅弘⁷・渦岡良介⁷・竹林洋史⁷・木村 誇²³・石丸 聡¹⁰
岡田成幸¹¹・内田賢悦¹¹・有村幹治¹³・植松武是²⁴・多々納裕一⁷・梶谷義雄²⁵
能島暢呂²⁶・田村圭子²⁷・中村洋光²⁸・戸松 誠²⁹

- 1 北海道大学大学院理学研究院
- 2 東京大学地震研究所
- 3 九州大学大学院理学研究院
- 4 東北大学大学院理学研究科
- 5 弘前大学大学院理工学研究科
- 6 名古屋大学大学院環境学研究科
- 7 京都大学防災研究所
- 8 鹿児島大学理工学域理学系
- 9 京都大学大学院理学研究科
- 10 北海道立総合研究機構環境・地質研究本部地質研究所
- 11 北海道大学大学院工学研究院
- 12 北海道大学公共政策学連携研究部
- 13 室蘭工業大学大学院工学研究科
- 14 北見工業大学工学部
- 15 東京大学大学院情報学環・学際情報学府
- 16 九州大学大学院人間環境学研究院
- 17 新潟大学災害・復興科学研究所
- 18 防災科学技術研究所社会防災システム研究部門
- 19 防災科学技術研究所水・土砂防災研究部門
- 20 北海道大学大学院農学研究院
- 21 弘前大学農学生命科学部
- 22 東北大学大学院工学研究科
- 23 防災科学技術研究所，気象災害軽減イノベーションセンター
- 24 北海学園大学工学部
- 25 香川大学創造工学部
- 26 岐阜大学工学部
- 27 新潟大学危機管理本部
- 28 防災科学技術研究所社会防災システム研究部門
- 29 北海道立総合研究機構建築研究本部北方建築総合研究所

要 旨

「平成30年北海道胆振東部地震」とその災害に関する総合調査を実施した。震度7を記録した揺れにより、同時多発斜面災害と、北海道全域同時停電（ブラックアウト）が発生

し、複合的な災害となった。震源の深さは約37kmで、大すべり域はそれより浅い20-25km付近であった。木造家屋の倒壊が多発したむかわ町市街では、地盤構造による地震波の増幅が見られた。同時多発斜面崩壊は、近隣の活火山の噴火による降下火砕堆積物が素因となった。札幌市内の地盤液化化地帯では、極めて軟弱な谷埋盛土層が確認された。地震発生が未明であったことが、建物倒壊による直接死が出なかったことに関係している可能性がある。ブラックアウトは、社会経済活動に大きな影響を与えた。

1. はじめに

平成30年9月6日3時7分ころ、北海道胆振地方東部の深さ37km付近を震源とするM6.7の地震が発生した。気象庁は、この地震を「平成30年北海道胆振東部地震」と命名した。この地震では、北海道厚真町鹿沼の気象庁観測点で震度7を観測した。北海道で震度7となったのは観測史上初である。この地震で、北海道中央部を中心に広い範囲で有感となり、震源から約60km離れた札幌市東区でも震度6弱を観測した。

この地震での死者は、厚真町・むかわ町・新ひだか町・苫小牧市・札幌市で関連死を含め42名となっている（内閣府、2019）。今回の地震では、震源に近い厚真町で、明治以降最大面積となる同時多発斜面崩壊が発生した（国土交通省、2018）。厚真町の直接死36名はすべて土砂災害による。

地震による揺れで、震源に近い北海道電力苫東厚真発電所の停止と送電線の事故の複合要因により、地震発生18分後から北海道全域同時停電（ブラックアウト）が発生し、社会経済活動に大きな二次的な被害をもたらした。新千歳空港が閉鎖となったほか、ATMの停止、食料やガソリンなどが欠品となった。北海道大学理学研究院では停電が9月8日14時まで続き、地震発生直後の調査研究に大きな支障を来した。

この地震とその災害の総合的な緊急調査を、文部科学省科学研究費補助金特別研究促進費の交付を受けて実施したので、その概要を報告する。

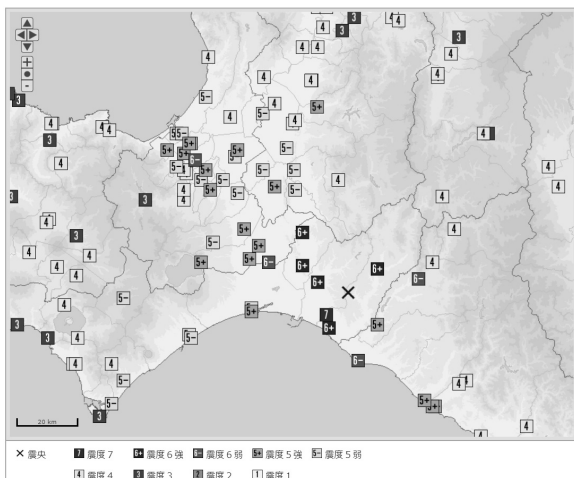


図-1 震度分布（気象庁震度データベースによる）

2. 研究計画の概要

今回の地震では、強い揺れを誘因とする多様な災害が発生したことから、課題ごとに以下の4つの研究班を組織して研究を進めた。

① 機動地震観測等による地震発生場とメカニズムの解明班

震源域周辺に機動地震観測点を設置して余震の観測を行う。精密な震源を得ることで余震域の形状を把握する。地下構造を推定する電磁気観測や、地殻変動・地殻流体等の調査も実施する。
班長：勝俣啓（北海道大学）・大園真子・橋本武志・青山裕（北海道大学）・酒井慎一（東京大学）・松本聡（九州大学）・岡田知己（東北大学）・小菅正裕（弘前大学）・寺川寿子（名古屋大学）・飯尾能久（京都大学）・中尾茂（鹿児島大学）・上嶋誠（東京大学）・柴田智郎（京都大学）・大津直（北海道立総合研究機構）

② 強震動観測による強震動生成機構の解明と地盤・建築被害の調査班

震源域周辺に機動強震観測点を設置して、震源特性・地盤特性を明らかにするほか、建築構造物被害、液化化等の地盤災害に関する調査、震源過程の解析を行う。

班長：高井伸雄（北海道大学）・飯場正紀・渡部要一・菊地優・岡崎太一郎・白井和貴・西村裕一・石川達也（北海道大学）・高瀬裕也・永井宏（室蘭工業大学）・宮森保紀（北見工業大学）・三宅弘恵（東京大学）・松島信一・浅野公之（京都大学）・重藤迪子（九州大学）・ト部厚志（新潟大学）・前田宜浩・石澤友浩（防災科研）・廣瀬亘（北海道立総合研究機構）

③ 同時多発斜面崩壊メカニズムの調査班

厚真町を中心に発生した同時多発斜面崩壊について、現地調査に基づき、表層地質や土質・すべり面の化学的・力学的特性の調査や土砂流動機構の解明を行う。

班長：小山内信智（北海道大学）・山田孝・笠井美青（北海道大学）・檜垣大助（弘前大学）・風間基樹（東北大学）・千木良雅弘・渦岡良助・竹林洋史（京都大学）・木村諤（防災科研）・石丸聡（北海道立総合研究機構）

④ 人的被害の様相と大規模広域同時停電が社会に与えたインパクト班

今回の地震で生じた直接的あるいは間接的な人的被害の様相を現地調査から明らかにする。ブラックアウトが社会インフラや経済活動、道民生活に与えた影響を調査する。

班長：岡田成幸（北海道大学）・内田賢悦（北海道大学）・有村幹治（室蘭工業大学）・植松武是（北海学園大学）・多々納裕一（京都大学）・梶谷義雄（香川大学）・能島暢呂（岐阜大学）・田村圭子（新潟大学）・中村洋行（防災科研）・戸松誠（北海道立総合研究機構）

3. 研究成果の概要

3.1 機動地震観測等による地震発生場とメカニズムの解明

震源域周辺に機動地震観測を配置し、当該地域に最適な地震波速度構造を用いて余震の再決定を行った。余震域は、本震直後から深さ40km～15km、南北に約30kmの幅で形成されていた。初期破壊は、余震域の最深部で横ずれ成分を持って始まった後、断層破壊はより浅部の南北方向に逆断層成分を主として広がった可能性が示された。余震分布の形状は、震源メカニズムの東落ち高角断層面と一致するが、その詳細な分布は「くの字」を組みあせたような複雑な形状を呈している（Katsumata et al., 2019）。斜面崩壊が多発した地域は、余震域の北半分周辺に相当する。大すべり域は、初期破壊域よりも浅く、余震域の浅部にあたる深さ20-30km付近であった（Kobayashi H. et al., 2019）。この場所は、余震活動が低調な部分に相当している。

今回の余震域は、深部から浅部まで東落ちの高角面状を呈している。国の主要活断層である石狩低地帯東縁断層帯南部の東落ち低角の形状とは一致しない。今回の地震が石狩低地帯東縁断層のクーロン破壊応力を上昇させた可能性が指摘されている（Kobayashi T. et al., 2019, Ohtani and Imanishi, 2019）。

今回の震源域では、定常的に震源が深い地震活動が見られており、2017年7月1日には深さ27kmでM5.1の地震が発生していた。また、厚真町周辺では1988年に群発的な活動があり、深さは25-28kmであった。

電磁気（MT）観測データから求められた比抵抗構造によると、今回の震源域は構造境界となっている可能性がある。また、同一観測点でMT観測を実施した結果からは、地震前後で顕著な構造の変化は見られていない。

石狩低地帯東縁断層帯は、ひずみ速度が周辺よりも最大1桁大きく、ひずみの集中帯となっていた

（Ohzono et al., 2019）。地震後に顕著な余効変動は見られていないが、ひずみ速度に変化が生じている可能性がある。このひずみ集中帯は、北海道北部まで連続している可能性がある（Ito et al., 2019）。

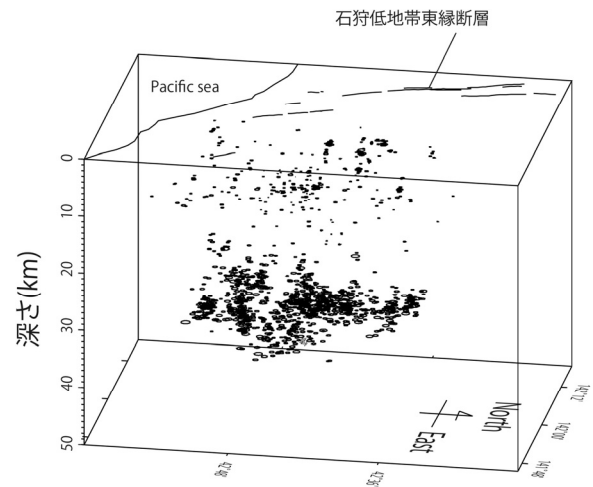


図-2 再決定された余震分布。東落ちの高角断層面とよい一致を示すが、微細構造は複雑である。

3.2 機動強震観測による強震動生成過程の解明と地盤・建築被害の調査

今回の地震では、北海道で観測史上初の震度7を厚真町鹿沼の気象庁観測点で記録した。また、北海道中央部で強い揺れとなり、震源から約60km離れた札幌市東区でも震度6弱となった。

観測された加速度は、防災科学技術研究所K-NET追分（HKD127）の1,796galが最大で、同じく防災科研KiK-net追分（IBUH01）で1,505gal、震度7を記録した気象庁厚真町鹿沼（JMA47004）で967.3gal（計測震度6.5）であった（いずれも3成分合成値）（防災科学技術研究所, 2018；気象庁, 2018）。斜面崩壊が多発した地域に最も近い観測点である厚真町京町では、加速度が461.9galで計測震度は6.0であった。木造建築の被害が集中した、むかわ町中心街にあるK-NET鶴川（HKD126、むかわ町松風）の最大加速度は662gal、震度は6強であった。

震源から距離100km程度以内では、一般的な距離減衰式よりも最大加速度や最大速度が大きかったことが明らかになった。KiK-net追分では短周期の応答が大きく、K-net鶴川やJMA鹿沼では1～3秒の応答が大きかったことが示された。機動強震観測で、むかわ町の建物被害が大きかった地域で余震の振幅が特に大きいことが確認された。この地域で実施した微動構造探査から浅部地盤構造が明らかにされ、この構造によるシミュレーションからむかわ町の地震動増幅特性をほぼ再現することが出来た（Takai et al., 2019）。

液状化により宅地に大きな被害が出た札幌市清田

区でボーリングやサウンディング調査を実施した。盛土は細粒分が多く密度が非常に小さい火山灰質土であることが確認された。盛土部は換算N値が1~4と非常に小さいこと、地下水位の違いにより地盤沈下の有無がみられた可能性が指摘された。また、液状化した宅地を模した振動台実験により、地下水位高の違いが液状化の形態に影響を及ぼした可能性が示された。苫小牧東港の液状化対策が行われていた区画では、震源に近いにも関わらず液状化が発生していないことが確認された。今回の地震では、免震構造では被害は見られていない。

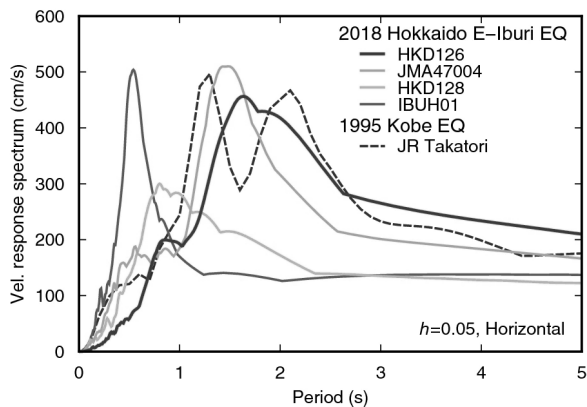


図-3 本震の速度応答スペクトル (Takai et al., 2019)

3.3 同時多発斜面崩壊メカニズムの調査

厚真町の同時多発斜面崩壊が発生した地域では、崩壊面積率が40%に及ぶ地域も確認された。この地域は、9,000年前の樽前山噴火によるTa-dや1.8万年前の恵庭岳噴火によるEn-a等の降下火砕物（軽石層）が堆積する地域であり、表層すべりのすべり面はTa-dやEn-aの最下部に相当していることが明らかにされた。

すべり面の土質サンプルをX線鉱物分析したところ、粘土鉱物であるハロイサイトが検出された。火砕降下物のせん断強度試験から、繰り返しせん断履歴により初期剛性が著しく低下する特性を確認した。この地域では、谷地形の浸食による斜面下部の切断による遷急線が形成され、斜面が力学的にも不安定であったことが示された。

層構造の発達した軽舞層での大規模な岩盤すべりの発生も認められ、河道閉塞による湛水が確認された。大きな人的被害が出た厚真町吉野地区の斜面の体積含水率は平均42.8%と高い値であった。直前の降雨に加え、長期的な積算降水量が関係していた可能性がある。この数値を参考に、地震動により斜面が液状化した水と土砂の混合物が斜面を流下するシミュレーションから、崩壊土砂が宅地に達する時間は6秒程度しかなかったことが推定された。これは、地

震動による斜面災害対策の難しさを示す結果となった。



図-4 厚真町の斜面表層崩壊の様相。

3.4 人的被害の様相と大規模広域停電が社会に与えたインパクトの調査

むかわ町で1階が崩壊した建物は店舗や店舗併用住宅が多く、地震発生が未明であったために人的被害が小さかった可能性が示された。今回の地震では、鉄筋コンクリート造の建築物への被害が限定的であったこと、木造建築でも震動被害が発生した場所は限られていたことが明らかにされた。

北海道全域同時停電（ブラックアウト）は、鉄道、水道、通信など社会情報インフラとその復旧に広く影響を与えたことが明らかにされた。復旧の順序は震度の大きさとは直接関係していない。道内事業所では、復電後の操業能力の回復に9日程度を要していた可能性が示されたほか、非製造部門を含めた売り上げの回復についてはより多くの日数を要した実態が明らかにされた。また、事業所の耐震化や設備の固定が一定の効果を上げていたことも示唆された。室蘭市民を対象にしたアンケートでは、若年層において要支援者の認知度が低いことが示された。地震発生が未明であったために、特に札幌市では帰宅困難の発生が抑制された可能性が高い。

4. 研究成果の発信

研究成果の迅速な発表を行う場として、日本地震学会等が運営する欧文誌「Earth Planets and Space」において特集号を企画した。研究速報を社会に発信することを目的として、北海道大学の高等教育推進機構オープンエデュケーションセンター科学技術コミュニケーション教育研究部門（CoSTEP・コーステップ）の映像メディア実習として、地震と災害の開説映像を製作し、「いいね！Hokudai」FBを通じて広報した（高橋他、2019）。

研究成果を社会に発信することを目的として、北

海道苫小牧市の苫小牧市民会館小ホールにおいて2019年3月17日に成果報告会を開催した。研究者や地質コンサルタント会社関係、地元行政機関、一般市民など200名の参加があった。



図-5 2019年3月17日に苫小牧市民会館小ホールで開催された成果報告シンポジウムの様子。200名の参加があった。

5. おわりに

平成30年北海道胆振東部地震は、最大震度7を記録し、震源に近い厚真町では同時多発斜面崩壊が発生して大きな人的被害が出た。北海道をはじめ、日本では近年の火山噴火による降下火砕物が堆積した地域が多く見られる。地震動による斜面災害のリスク対策について、技術的・社会的な側面からの検討が必要である。ブラックアウトは、北海道全域に社会経済的な影響を及ぼした。電源喪失は、特に冬季の被災時に重大な支障を及ぼす可能性があり、重要施設においては非常電源の確保を進める必要がある。札幌市内の地盤災害は、人工的な谷埋盛土の軟弱地盤で発生した。より強い揺れにより、より広範囲に被害が出る可能性がある。地盤特性により地震波が増幅されたむかわ町市街では、2階建て木造建築が多数倒壊したが、地震発生時刻によっては人的被害が発生していた可能性がある。今後も耐震化を着実に進める重要性が示された。札幌都市圏を含む石狩低地帯は、ひずみの集中域となっており、今後も地震に対する対策を着実に進める必要がある。下部地殻もしくは上部マントルの深度に相当する37kmという深さで地震が発生する要因については未解明であり、今後、調査研究を進める必要がある。

謝 辞

本研究の実施にあたり、文部科学省研究開発局地震・防災研究課、同省学術振興局学術研究助成課、東京大学地震研究所地震・火山噴火予知研究協議会

企画部、京都大学防災研究所自然災害研究協議会、北海道庁、厚真町、むかわ町、安平町、札幌市、北海道大学理学部生命事務部研究協力系の協力を頂きました。また、成果報告会の実施にあたり、北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター、北海道地区自然災害科学資料センター、北海道大学突発災害防災・減災共同プロジェクト拠点、室蘭工業大学環境科学・防災研究センターから共催を頂きました。記して感謝の意を表します。

参考文献

防災科学技術研究所（2018）：平成30年北海道胆振東部地震による強震動，
http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/html20180906030750/main_20180906030750.html（閲覧2019年6月28日）。

Katsumata K., M. Ichianagi, M. Ohzono, H. Aoyama, R. Tanaka, M. Takada, T. Yamaguchi, K. Okada, H. Takahashi, S. Sakai, S. Matsumoto, T. Okada, T. Matsuzawa, S. Hirano, T. Terakawa, S. Horikawa, M. Kosuga, H. Katao, Y. Iio, A. Nagaoka, N. Tsumura, T. Ueno, the Group for the Aftershock Observations of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake (2019): The 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake (MJMA = 6.7) was triggered by a strike-slip faulting in a stepover segment: insights from the aftershock distribution and the focal mechanism solution of the main shock, *Earth Planets Space*, 71:53

気象庁（2018）：強震波形（胆振地方中東部の地震），
https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/1809060307_hokkaido-iburi-tobu/index.html， 閲覧2019年6月28日。

Kobayashi H., K. Koketsu, H. Miyake (2019): Rupture process of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake derived from strong motion and geodetic data, *Earth Planets Space*, 71:63.

Kobayashi T., K. Hayashi, H. Yurai (2019): Geodetically estimated location and geometry of the fault plane involved in the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake, *Earth Planets Space*, 71:62.

国土交通省（2018）：「平成30年北海道胆振東部地震の被災地の皆様へ緊急のお知らせ」「平成30年北海道胆振東部地震の崩壊面積は明治以降の地震災害で最大」、閲覧2019年8月11日。

内閣府（2019）：平成30年北海道胆振東部地震に係る被害状況について、閲覧2019年8月11日。

Ohzono M., H. Takahashi, C. Ito (2019): Spatiotemporal crustal strain distribution around the Ishikari-Teichi-Toen fault zone estimated from global

- navigation satellite system data, *Earth Planets Space*, 71:50.
- Ohtani M., K. Imanishi (2019): Seismic potential around the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake assessed considering the viscoelastic relaxation, *Earth Planets Space*, 71:57.
- Takai N., M. Shigefuji, J. Horita, S. Nomoto, T. Maeda, M. Ichiyanagi, H. Takahashi, H. Yamanaka, K. Chimoto, S. Tsuno, M. Korenaga, N. Yamada (2019): Cause of destructive strong ground motion within 1–2 s in Mukawa town during the 2018 Mw 6.6 Hokkaido eastern Iburi earthquake, *Earth Planets Space*, 71:67.
- Takahashi H., R. Kimura (2019): The 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake and its Aftermath, *J. Disaster Res.*, 14 Sci. Comm., sc20190112.
- 高橋浩晃・谷内元・早岡英介（2019）：インタビュー：北海道胆振東部地震における揺れ方と震源の特徴、*科学技術コミュニケーション*、25、51-62.

平成30年台風21号による強風・高潮災害の総合研究

--科学研究費補助金・特別研究促進費による突発災害調査研究 平成30年度報告--

丸山 敬

京都大学防災研究所

要 旨

科学研究費補助金・特別研究促進費による突発災害調査研究により、台風1821号による強風・高潮災害について、現地調査、アンケート調査、数値解析等により総合的な調査・研究を行った。その結果、強風や豪雨、突風や落雷等に関する観測・解析データ、人や建物、構造物の被害実態、自治体、公共団体などの被害統計や風の観測記録、高潮による水位変化と高波の越波による被害の実態、災害対応、復旧・復興体制の実態、被害のもたらした影響等を明らかにした。これにより、被害発生に関連する気象学的要因、人や建物、構造物への被害発生プロセス、高潮発生要因と被害メカニズム、災害対応状況等を明らかにし、被害低減策、災害対応、復旧・復興体制の検証を行い、今後の課題についても検討した。本報は突発災害調査研究報告書をまとめたものである。

1. はじめに

平成30年9月4日に「非常に強い」勢力を保ったまま徳島県南部に上陸し、その後兵庫県神戸市付近に再上陸した台風21号は、四国や近畿地方に記録的な暴風をもたらした。この台風はまた記録的な高潮ももたらした。この台風はまた記録的な高潮ももたらした。接近・上陸に伴って近畿や四国の沿岸部では急激に潮位が上昇し、大阪では1961年の第2室戸台風の時に観測した過去の最高潮位を瞬間的に上回る値を観測した。さらに、四国や近畿、北陸周辺に台風本体の活発な雨雲がかかった。これらにより、樹木の転倒、建物屋根の飛散、床上・下浸水などの住宅被害、トラックの横転、建設現場の足場やクレーン、さらには、港のガントリークレーンの倒壊など、多大な被害をもたらした。大規模な停電も発生した。大阪湾沿岸では、強風に伴う高潮被害、関西国際空港では浸水および漂流したタンカーの衝突による連絡橋の破損など、公共インフラ、土木構造物などにも多大な被害をもたらした。本報ではこれらの概要をまとめる。

2. 台風21号の気象学的特徴

2.1 台風経路

平成30年台風21号（T1821、アジア名 Jebi）は、

8月28日南鳥島近海で発生し31日9時には915hPaに達し、“猛烈な（最大風速54m/s以上）”勢力に発達した。21号は伊勢湾台風と比較的似た経路で北上し、その後、やや西寄りに向かい、第2室戸台風に近い経路をとり、9月4日12時に950hPaで徳島県南部に上陸した後、紀伊水道をぬけ、淡路島を通過して4日14時には神戸市に上陸した。9月5日3時に北海道渡島半島西部に達し、5日9時に温帯低気圧に変わった（図1,2）。本州上陸時に950hPaで、非常に強い勢力のまま上陸したのは、1993年の台風13号以来25年ぶりであった。台風21号は、上陸時の移動速度も早かったため、四国、近畿から北海道に至る広範囲で強風が観測され、近畿を中心として広い範囲に大きな被害をもたらした。

このように、非常に強い台風が大阪など大都市を襲ったのは稀であり、近年最大瞬間風速が50m/sを超える強風に大都市が曝されたのも初めての経験といえる。期間最大風速および最大瞬間風速が観測記録を超えたのは概ね危険半円側の地点であり、北陸、東北、北海道日本海側でも記録更新が見られた。また、台風通過後の吹き返しによる強風も強く、高知県室戸岬では西向きに48.2m/s、新潟県両津および石川県金沢では南西に28.8m/sの最大風速を観測した。

2.2 最大瞬間風速の分布

図3に9月4日～5日の間に最大瞬間風速 20m/s 以上を観測した地点を示す。図中の実線で示す台風中心経路を挟んで東側に高い最大瞬間風速を示した地点が分布している。経路近くでは 30m/s 以上を示した地点が集中しており、高い値では 50m/s を超えている。同期間に観測された最大瞬間風速の上位 6 位が 50m/s を超えており、それらの風向のほとんどは南南西から南で概ね台風最接近時に観測されている。特に近畿圏では、関空島（大阪府泉南郡）で南南西の風・最大瞬間風速 58.1m/s（最大風速 46.5m/s）、和歌山（和歌山市）で南南西の風・最大瞬間風速 57.4m/s（最大風速 39.7m/s）、室戸岬（高知県室戸市）で西の風・最大瞬間風速 55.3m/s（最大風速 48.2m/s）を記録するなど、これまでの記録を更新する強風が観測された。さらに、関東地方のように中心経路からかなり離れている地域でも 40m/s 近い最大瞬間風速を記録し、広域にわたって強風をもたらした。

2.3 突風の発生メカニズム

建物等に被害を及ぼす強風の原因となる突風は、台風に伴う循環だけでなく、その中にある積乱雲、さらには地形や都市構造物などさまざまな要因が複合して生じていると考えられる。

台風に伴う突風の発生場所をみると、図 4.5 に示すように、台風中心に対して 150km 以内の北東から南東にかけての領域（危険半円）に集中していた。積乱雲の活動と突風発生との関連を対流活動の指標であるレーダーエコー強度でみると、降雨強度 48mm/h の強エコー下の突風（図中黒塗り）は台風の中心付近で発生しており、中程度のエコー（同グレー）、弱エコー（同白抜き）になるに従い、台風中心から離れた場所で発生していた。顕著な被害をもたらした最大瞬間風速が 50m/s を超えるような突風は、台風

の中心から 50km 以内の積乱雲直下で発生していた。また、図 6 に示す高度 2km のレーダー反射強度とデュアル・ドップラー解析をみると、白線で囲んだ付近の黒矢印群（台風の移動に相対的な風速ベクトル）で示されるように、台風中心の北東側に局所的に反時計回りの回転風系（メソ擾乱）が存在し、地上風（灰色矢印）はここに吹き込むような風系が存在し、このメソ擾乱の北東側で強い降水が存在している。

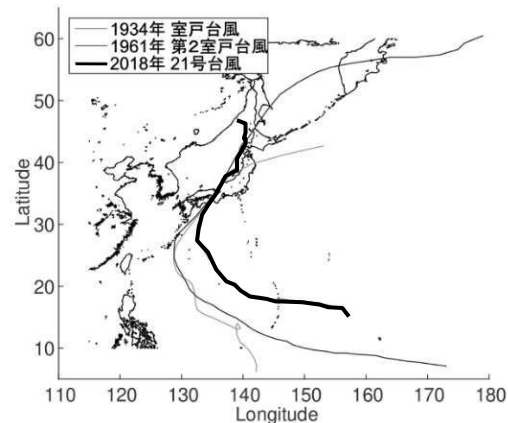


図2 過去台風の経路比較

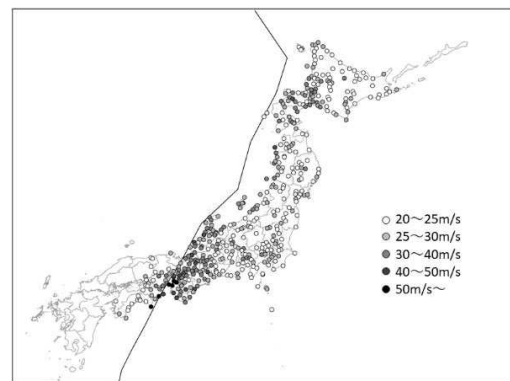


図3 平成30年9月4日～5日に20m/s以上の最大瞬間風速を記録した地点

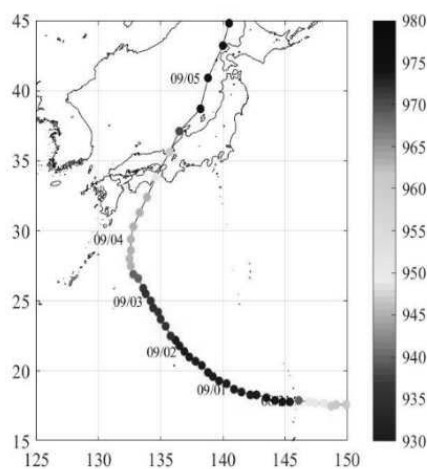


図1 台風21号の経路と中心気圧の推移

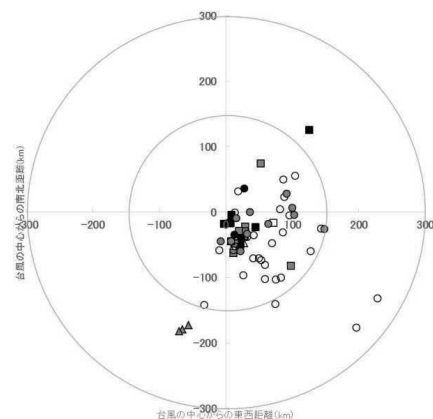


図4 上空のエコー強度別にした突風発生場所。黒塗り：降雨強度 48 mm/h の強エコー，グレー：12～48 mm/h の中程度のエコー，白抜き：12 mm/h 未満の弱エコー

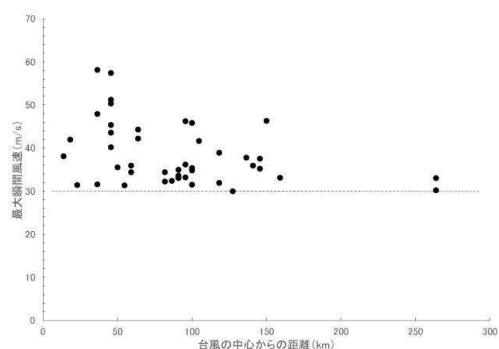


図5 最大瞬間風速（30 m/s 以上）と台風からの距離の関係。

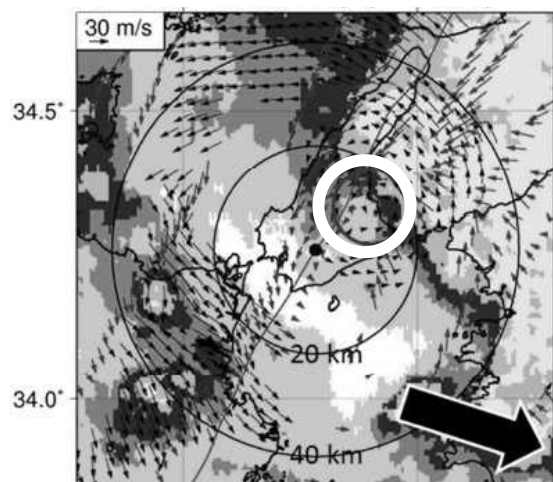


図6 9月4日0400 UTCにおける、高度2kmの台風の移動に相対的な風ベクトル（黒矢印）、台風の移動に相対的な地上最大瞬間風速（灰色矢印）及び高度2kmのレーダー反射強度の分布

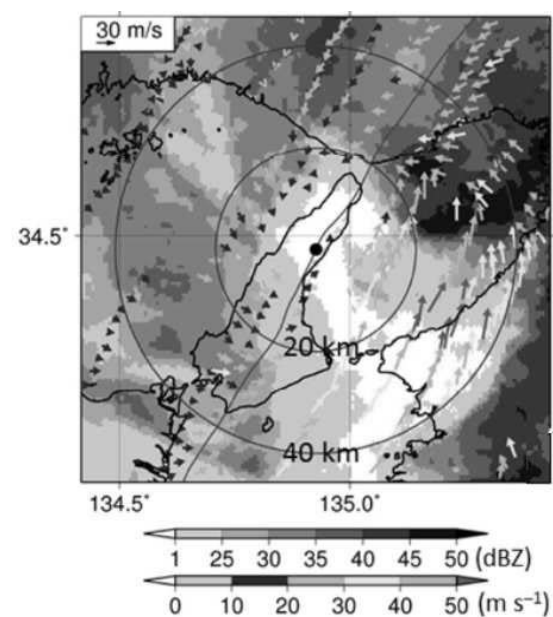


図7 9月4日0430 UTCにおける、地上最大瞬間風（カラー）及び高度2km反射強度（白黒）の分布。

さらに台風が北進すると、大阪湾沿岸、大阪府南部において、50m/sを超す地上最大瞬間風速が台風の進行方向右側の半径20–40km以内に観測されており（図7）、この風速には15m/sという台風移動速度が大きく寄与している。

2.4 市街地内の強風

台風21号では大阪市内（大阪中央区）において最大瞬間風速47.4m/sが観測され、市街地でも強風の被害が多く見られた。市街地内の風はビルの密集度合いや高層ビルの配置の影響を受け、場所によって大きく変化すると考えられ、局所的に極めて強い風が吹いた可能性がある。ここでは、数値計算により大阪市内の強風場を再現した結果を参考に、台風時の市街地内での強風特性を見る。

現在、気象モデルを用いた数値解析が気象予測などに広く用いられており、図8に示すように再現計算は実台風を精度よく再現し、10分間平均風速の観測値は計算結果に良く対応する。さらに、変動風速場を再現することのできるLESモデルを用い、21号台風時の南風を想定した計算を行って変動風速場を再現した結果をみると、図9に示すように、地上10mにおいて市街地内でも場所によっては瞬間的に60m/sから70m/sに迫る強風が吹いていたと推定された。このように、都市のビルや構造物によって上層の強風が街区の低層まで入り込む様子が示され、台風時の地上付近における強風発生メカニズムとして、台風循環および周辺場の風、積乱雲からのダウンドラフト（ダウンバースト）、地形や構造物による増幅という3つの効果が影響しあうことが明らかになった。

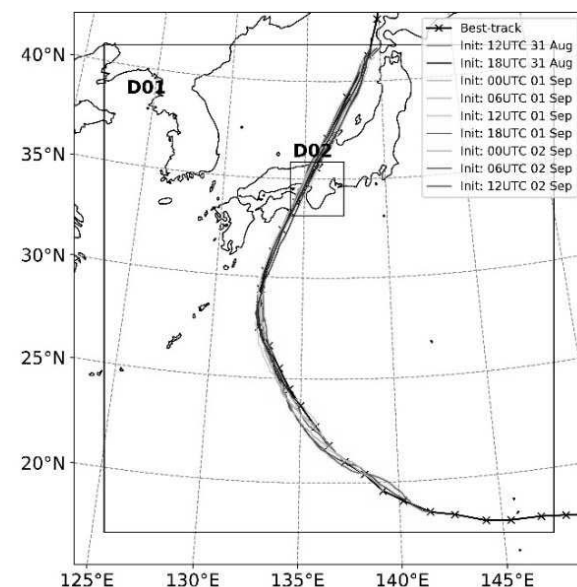


図8 台風経路（ベストトラックおよびWRF計算）

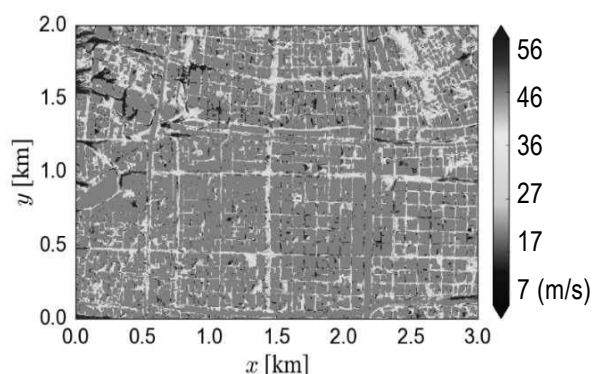


図9 大阪市街地での地上10mでの最大瞬間風速の分布

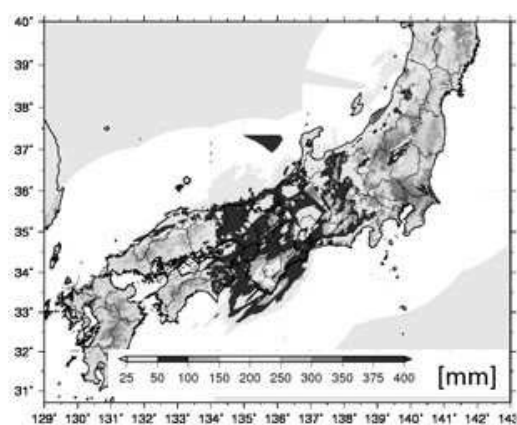


図10 9月4日10～24時の総降雨量

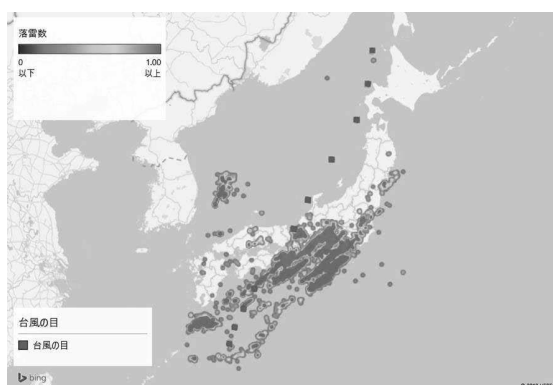


図11 2018年9月4日03時～5日06時の落雷頻

2.5 降雨

台風21号に伴う降雨は、図10に示すように近畿地方を中心に四国、中国、北陸、東海地方に広がり、特に紀伊半島南部で多大な降雨量を観測した。大阪湾沿岸の降雨量については、兵庫県淡路市や洲本市において6時間雨量でそれぞれ139.0mm、135.5mm、1時間雨量で85.5mm、74mmを記録した。また、大阪府能勢町では1時間雨量で69.0mm、兵庫県神戸市では1時間雨量で60.0mmを記録しており神戸市や淡路島の沿岸では豪雨による被害も多く、短時間降雨による下流域への集水も生じていたと考えられる。

2.6 落雷活動

台風21号に伴う雷活動は、対地雷撃（落雷、CG）数が8000回を超え、比較的に活発だったといえる。図11に示すように、9月4日3時から5日6時までの落雷頻度は、近畿から関東の太平洋沿岸に落雷は集中しており、台風南方のアウトターレインバンドを形成する積乱雲からの落雷頻度が高かった。

2.7 高潮、高波

この台風はまた、高潮、高波をももたらし、特に大阪湾では、大阪と神戸の検潮所でそれぞれ3.29mおよび2.33mの最大水位（大阪管区气象台）を記録し、防潮堤の内外において浸水被害が発生した。陸上に残された痕跡調査による最大水位の分布をみると図12のように、局所的には最大3.5m前後の高潮偏差、最大6mを上回る高潮と波浪による遡上・越波が観測された。具体的には淡路島南、和歌山港付近で4mを超える浸水高（波浪の影響を含む）、大阪湾奥大阪港で3.5～4.0mの浸水高（多少の波浪成分を含む）、西宮～神戸で2.0～3.0m程度の浸水高が記録され、波浪による影響を加えると最大5m以上の浸水高が記録された。

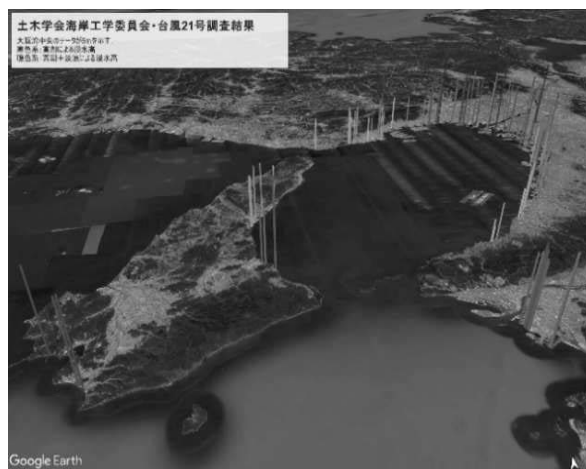


図12 土木学会の調査結果にもとづく浸水高の空間分布(寒色系：高潮偏差，暖色系：高潮偏差+波浪影響（土木学会,2018;森ら,2018）

3. 強風災害

ここでは台風21号によって引き起こされた強風被害について概観する。現地調査、自治体、公共団体などの被害統計などを用いて各種被害の様子を地域別にまとめた。とくに、被害の大きかった大阪府南部および和歌山県北部の被害に関しては現地調査だけではなく小型飛行機からの映像や衛星写真を使った調査結果も紹介する。

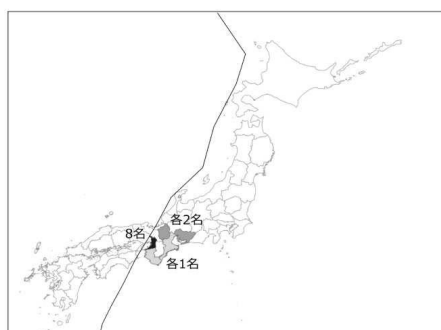
3.1 全国の被害の概要

台風 21 号による人的被害・建物被害は広く全国に分布している。図 13 a に示す通り、死者は経路に近い危険半円側で生じている。死因は、部屋に飛び込んだ飛散物、全壊した倉庫の下敷き、屋根からの転落などが含まれている。一方、負傷者については危険半円側の広域で発生しているが、大阪府が他に比べ突出している（図 13 b）。

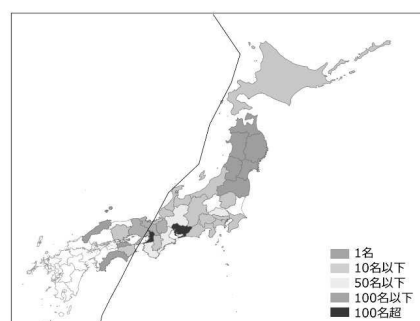
住家被害数は図 13 c~f に示すように、全壊家屋の分布は経路近傍に集中しており、半壊、一部損壊と、被害の程度が下がるにつれて危険半円側に被害範囲が拡大していることが分かる。一部損壊以上の被害家屋数を各都道府県の世帯数で除した被害率を見ると、台風経路の危険半円側近傍において被害率が高く、大阪府の値が突出している。

3.2 近畿地方の被害概要

次に被害が集中している近畿地方についてみると、図 14 a,b に示す通り、死者は台風経路に対して危険半円側に分布しており、負傷者まで含めると危険半円側に広がって分布している。住家被害については図 14 c~f に示すように、全壊家屋の分布は大阪府の市町村を中心に台風経路に対して危険半円側に存在しており、半壊、一部損壊以上の被害家屋総数と分布範囲は台風経路に対して危険半円側へと拡大している。被害率は大阪府の各市町村で被害率が突出しており、最大瞬間風速が 58.1m/s を記録した関西国際空港の対岸に位置する泉佐野市が最も高い被害率となっている。



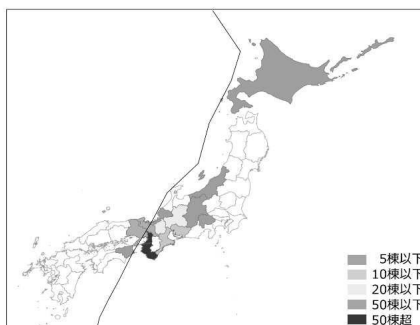
a. 都道府県別の死者数



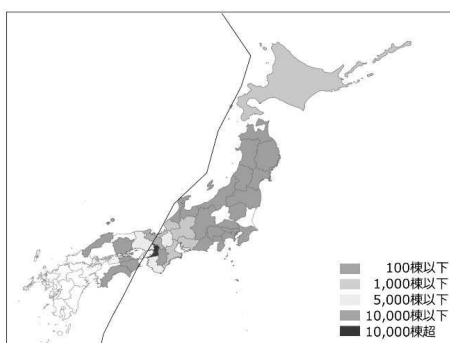
b. 都道府県別の負傷者数



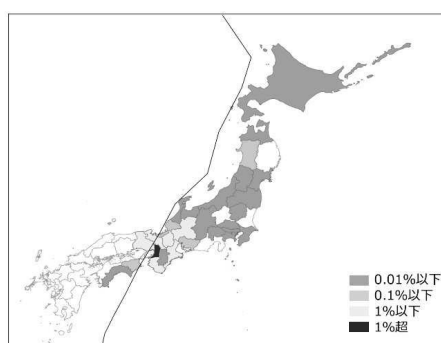
c. 都道府県別の全壊住家数



d. 都道府県別の半壊住家数

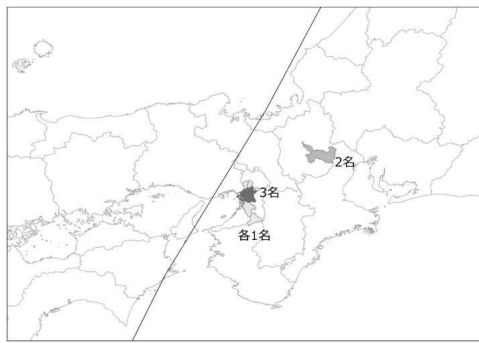


e. 都道府県別の一部損壊以上被害住家数

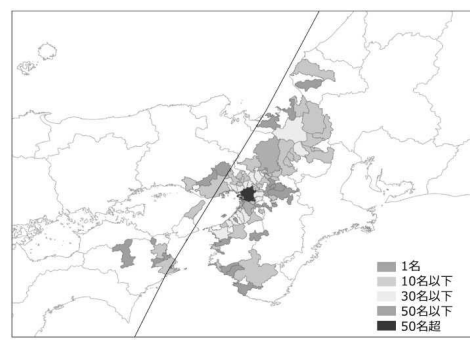


f. 都道府県別の住家被害率

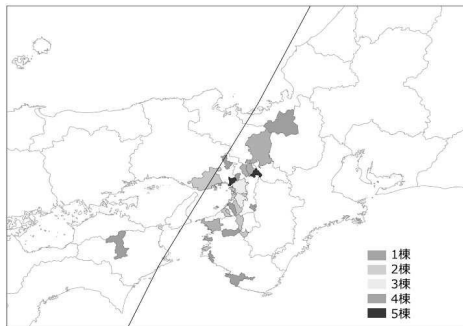
図 13 台風 21 号による全国の被害分布



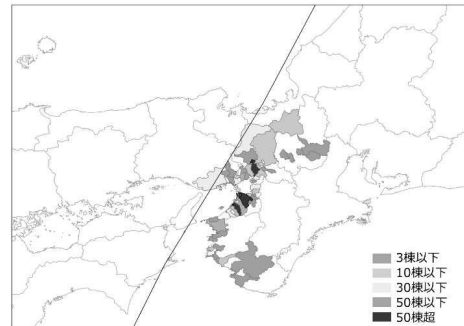
a. 市町村別の死者数



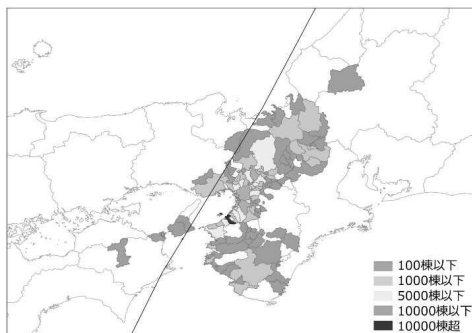
b. 市町村別の死傷者数



c. 市町村別の全壊住家数



d. 市町村別の半壊住家数



e. 市町村別の一部損壊以上被害住家数



f. 市町村別の住家被害率

図 14 台風 21 号による近畿地方の被害分布

3.3 北海道の被害概要

この台風では北海道でも強風が吹き、倶知安町で 42.4m/s、岩見沢市で 37.6m/s の最大瞬間風速を記録し、22 地点において日最大瞬間風速の観測史上 1 位を更新し、各地で被害をもたらした。図 15 に示す北海道内の住家被害の市町村別の分布をみると、太平洋側から道央にかけて被害棟数が多い傾向にあった。

3.4 大阪府南部の被害

大阪府は台風経路に最も近いエリアであり、とくに南部に被害が多かったが、4 万棟を超える住家被害の全貌を行政の統計から迅速に把握することは困難である。そこで、被害分布の概要を調べるために、大阪府南部と和歌山県北部の上空に小型飛行機を飛ばして上空から撮影した映像と衛星写真を用いて調

査したブルーシートの分布状況により、被害分布を推定した結果を以下に示す。

3.4.1 飛行機からの映像による住家被害推定

飛行機からの映像による解析から、図 16 のようにブルーシートは大阪府南部の海岸付近で密度が高かった。行政区域別ごとの一部損壊以上の被害住家数とブルーシート数との関係は図 17 のように得られ、一部損壊以上の被害住家数の極端なデータを除いたものに関しては図中の破線で示す線形関係が得られた。さらにこの関係を使って、和歌山県の一部行政区域で、住家被害の調査結果が出ていない地域の住家被害率を推定したところ、和歌山市において後日明らかになった住家被害数と推定値はほぼ一致した。図 14f に推定値を追加したものを図 18 に示す。

3.4.2 衛星データを使った住家被害推定

衛星写真を使ってブルーシートで覆われた住家を抽出し、被害があった住家を推定した。また、2 節で示した気象モデルによる計算値から、地上 10m における最大風速を図 19 のように推定し、屋根被害率と最大風速の関係を図 20 のように得た。これより、建築基準法および関連法規で規定された風速（粗度区分に応じて換算した基準風速）以下でも相応の被害が広範囲で出ていること。換算基準風速を超えた地域で劇的に被害率が増加しているわけではないこと。換算基準風速前後での被害率が 5.5～7.5%程度であることが明らかになった。

3.4.3 ヒアリング調査

住家被害の多かった泉佐野市の一部地域を対象に、現地での聞き取り調査を行った結果によると、古い

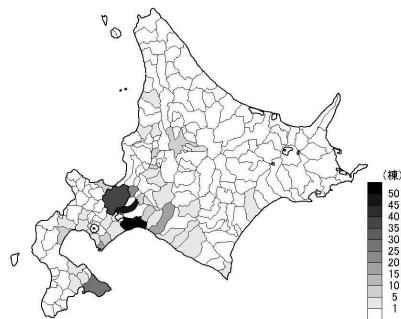


図 15 市町村別の住家被害の状況

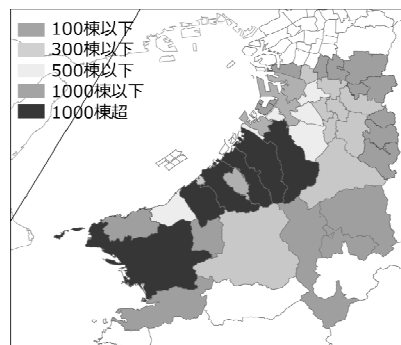


図 16 大阪府南部・和歌山県北部の市町村別ブルーシート数

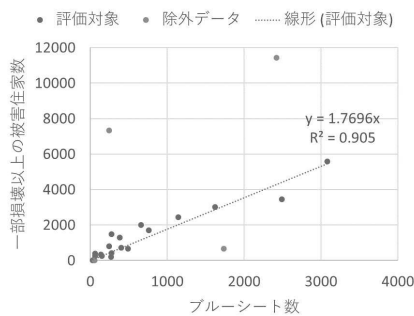


図 17 市町村別ブルーシート数と被害住家数の関係

木造和瓦葺きの住宅を中心に屋根葺材の飛散被害が発生し、その被害に伴う飛来物によって耐風設計された新しい住宅でも外装材被害が発生したこと。新しい住宅や維持管理が行われていた住宅の屋根被害はほとんど確認されず、屋根葺材の耐風設計に関する規則改正やガイドライン整備が功を奏していることがわかった。

3.5 各種建物・構造物の被害

今回の台風では近畿地方を中心として、広範囲の建物・構造物の被害が発生した。観測や解析結果に示されるとおり、大阪府南部で瞬間風速 50m/s、大阪市内で瞬間風速 45m/s こえる強風が吹いており、多種多様な被害が発生した。また、大阪湾沿岸部では高潮・高波による被害も発生した。以下ではこれら各種建物・構造物の被害について概観する。

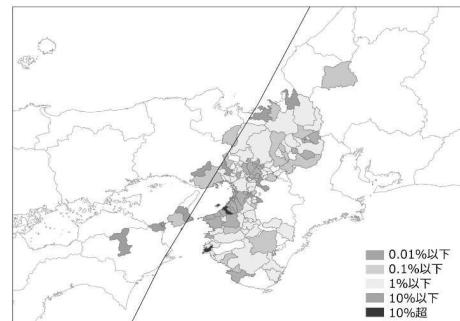


図 18 近畿地方市町村別の被害住家率（推定値を追加）

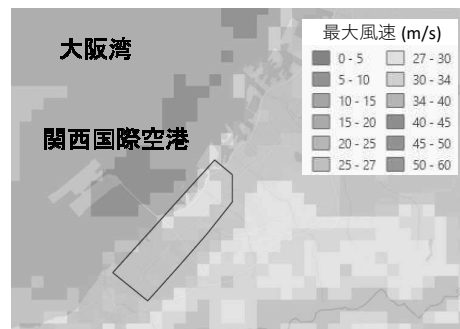


図 19 地上 10m における最大風速の推定値（図中の赤枠内が屋根被害分析対象地域）

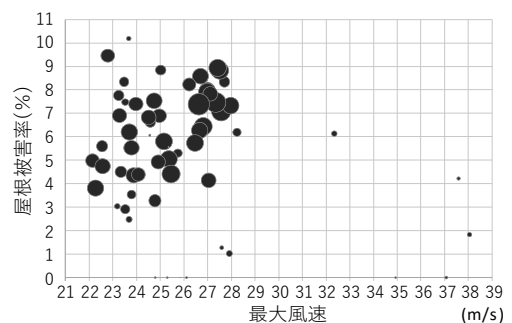


図 20 最大風速と屋根被害率の関係（図中の円の大きさは評価グリッド内の住宅数に比例する）

3.5.1 大規模建築物の被害

市街地では高層ビルや大スパン建物の被害が見られた。これらの多くは外装材の被害（図 21,22）が主であるが，高層階まで飛来物が飛んできたと推定される被害（図 23）も見られた。ビルの外装材が破壊されることにより，風雨の侵入による室内の被害（図 24）。室内側の気圧の急激な変化により，室内や軒の天井の脱落（図 25,26），内装材・間仕切り壁の破損（図 27）などが見られた。



図 21 マンションの屋根葺き材の飛散



図 22 体育館の屋根の飛散

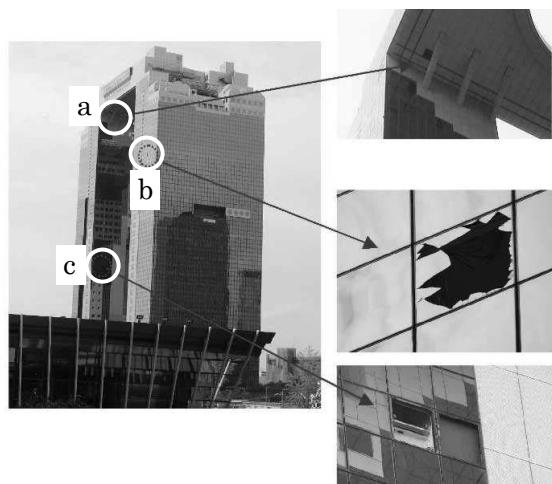


図 23 高層ビルの外装材の被害
(b 部分は飛来物によるものと推定)



図 24 窓ガラスの破損によるビル室内の被害



図 25 ビル室内の天井の脱落



図 26 ビルの軒の天井の脱落



図 27 店舗の間仕切り壁の被害

3.5.2 建築物およびその付属物の被害

住家の被害については、屋根ふき材や壁、窓ガラスなどの外装材の破損(図 28-30)や付属物の被害(図 31-33)。また、破損物の飛散による被害(図 34-36)、伝統的建築物の被害(図 37)、塀(図 38)、門扉、欄干などの被害などの倒壊、転倒の例が見られた。



図 28 瓦の飛散



図 29 屋根ふき材のめくれ・飛散



図 30 屋根の飛散・小屋組みの被害



図 31 集合住宅の手すりの被害



図 32 建築物上設置太陽光発電システムの被害



図 33 自動販売機の転倒



図 34 薄板鋼板屋根の飛散による被害



図 35 看板への飛来物の突き刺さり



図 36 飛来物の衝突による自動車の被害



図 37 神社拝殿の倒壊



図 38 コンクリートブロック塀の倒壊

3.5.3 その他の被害

その他の被害としては足場の被害（図 39）、太陽光発電システムの被害（図 40）、工作物（図 41）、農業施設（図 42）などが見られた。

3.5.4 交通・インフラの被害

交通・インフラの被害としては、高速道路の被害（図 43）。大阪港、神戸港内の人工島では、強風や浸水により、港湾施設が被害を受けた（図 44）。また、強風により流された船舶の衝突により、関西国際空港連絡橋が被害を受けた（図 45）。船舶による橋梁への衝突はこれ以外にも阪神高速道路湾岸線、県道芦屋鳴尾浜線でも発生した。また、車の横転も各地で見られた（図 46,47）。



図 39 防音パネル足場の倒壊



図 40 水上設置型太陽光発電システム設備の被害



図 41 広告板の倒壊



図 42 パイプハウスの倒壊



図 43 遮音壁の損傷



図 44 ガントリークレーンの倒壊

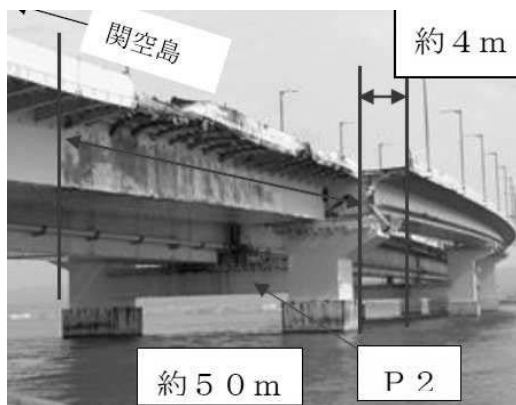


図 45 船の衝突による空港連絡橋の損傷
(国土交通省, 2018)



図 46 橋梁上での車両の横転



図 47 車両被害の発生位置および転倒方向

3.5.5 電力施設の被害

電力施設の被害(図 48)としては、関西電力管内(図 49)において、電柱の倒壊は合計 1343 本。うち、飛来物・建物倒壊に伴う 2 次被害は 788 本(89%)に及んでおり、風力のみによる倒壊はみられなかった。また、配電設備の被害は高圧線 4914 径間、柱上変圧器 362 台、地上機器 38 台、地中ケーブル 544m で、高圧線の断線は大阪と和歌山で多く、柱上変圧器の被害は神戸と和歌山で、地上機器の被害は神戸で多く、地中ケーブルの被害は大阪南でのみ発生した。その他、配電線の回線数では 3765 回線、停電戸数では 220 万軒におよび、回線数については阪神・淡路大震災(649 回線)をはるかに上回る規模のものであった。



図 48 電力施設の被害

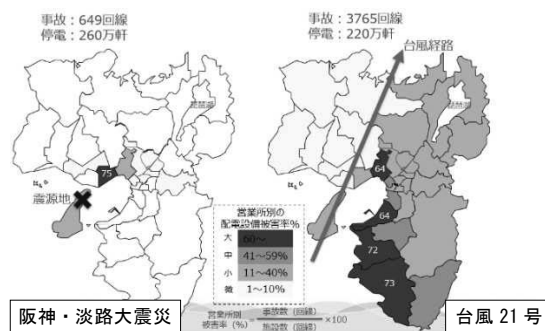


図 49 関西電力管内の被害

4. 高潮・高波(浸水)災害

台風 21 号により、都市部では高潮・高波による被害が発生した。特に、人工島や埋立地での被害が顕著であった。今回の台風による高潮は、第 2 室戸台風に基づいて想定された高潮水位を超えたため、堤外地には大きな浸水被害をもたらしたが、防潮対策の高さ不足による市街地への高潮の越流はほとんど確認されなかった。しかし、護岸や防潮堤に対して高波が作用し、越波による浸水被害が生じた例は多くみられた。以下では、都市部の主な被害について概説する。

4.1 都市部の高潮・高波による浸水被害

4.1.1 埋立地・人工島の浸水被害

南芦屋浜では潮芦屋ビーチにおいて、図 50 のように、約 10 基のコンテナの漂着が確認されており、さらに、階段護岸上の公園や背後の道路に漂流物が散乱していたことから、護岸を越えた越波による浸水が発生していたと考えられる。また、芦屋ベランダと呼ばれる南側護岸においても、護岸上に整備された駐車場が洗掘されていたことから、越波が起きていたことがわかった。さらに、護岸背後の涼風町の道路には、図 51 のように、かなりの量の砂が堆積しており、越波が激しかったことが推察された。また、涼風町の住宅の外壁に明瞭な浸水痕跡が確認され、

床上浸水が発生していたことがわかった。

西宮市の浜甲子園でも同様に、甲子園浜背後の護岸を越波した氾濫水が、県道 340 号線を南から北に向かって浸水した。同様に今津灯台付近でも、護岸を越えた高潮が今津浜の道路を冠水させた。さらに、漂流した台船が阪神高速湾岸線側道の県道 573 号線の橋脚に衝突し、橋桁が動き、復旧に時間を有する被害が生じた。

六甲アイランドでは、高潮による浸水が顕著であった。図 52 に六甲アイランドで撮影された浸水状況を示す。大規模な浸水により自動車やコンテナが流され、道路上に散乱した。また、六甲アイランドと対岸を結ぶ六甲大橋の出入口付近の道路が冠水し、島は約 3 時間にわたり孤立状態になった。阪神淡路大震災の際に、ポートアイランドに架かる神戸大橋がずれて島が孤立し、その後、代替アクセスとして神戸港島トンネルが整備された。しかしながら、沈埋トンネルは風水害の浸水に対して脆弱で、今回も翌 9 月 5 日まで通行止めが続いた。

4.1.2 防潮ライン外側の浸水被害

防潮ラインの外側、いわゆる堤外地の浸水被害の例として、神戸ハーバーランドにおける高浜岸壁が図 53 のように高潮で浸水し、煉瓦倉庫レストラン街が水に浸かった被害が挙げられる。また、ハーバーランドの西側に位置する東川崎町の湊小学校周辺でも、浸水が発生した。防潮ゲートが閉められたために、住宅地への高潮の浸水は防がれたが、その一方で、排水が追いつかずに、内水氾濫による床上浸水が起こった。

サンシャインワープ神戸では、腰から胸の高さまで浸水し、避難する人にとって大変危険であった。一方、サンシャインワープ神戸のショッピング施設の背後の道路と住宅地との間には防潮堤が整備されており、住宅地では浸水被害は発生しなかった。

4.2 小河川の氾濫被害

台風 21 号による高潮は、河川水位の有意な上昇をもたらした。高潮の河川遡上で顕著だったのは淀川であった。淀川にかかる淀川大橋では高潮の影響により堤防高を 21cm 超過したが、その下流の阪神なんば川淀川橋梁、伝法大橋では、防潮鉄扉（陸閘）が閉鎖されて浸水が回避された。

台風通過に伴い、9 月 4 日 13:00-14:00 の間に時間雨量 50mm 以上の雨が、大阪府から兵庫県東部にかけて降った。この短時間強雨が、河川水位の上昇に寄与したと考えられる。特に六甲山系の中小河川は河床勾配が急なため、流出時間が短く、短時間強雨

による影響が大きく、津門川が氾濫危険水位を超過し、宮川（兵庫県芦屋市、図 54）と高橋川（兵庫県神戸市東灘区）で小規模な氾濫が発生した。



図 50 潮芦屋ビーチへのコンテナ漂着



図 51 芦屋市涼風町における越波浸水の痕跡



図 52 六甲アイランドにおける浸水被害
(Twitter より, 9/4 14:23 配信)



図 53 煉瓦倉庫レストラン街の浸水
(Twitter より 9/4 14:44 配信)



図 54 宮川の氾濫と溢水
(Twitter より 9/4 14:44 配信)



図 55 六甲アイランドにおけるコンテナの散乱

4.3 港湾・船舶の被害

六甲アイランド東側では高潮と波浪により、甚大な被害が発生した。図 55 はコンテナの漂流状況であり、高潮による流れでコンテナが漂流し、コンテナターミナル外周のフェンスまで流されて集積したものと推定される。自動車の被害は、高潮で流されただけでなく、波によって持ち上げられて積み重なり、被害が拡大した。六甲アイランド東側は地盤が全体に低く被害が大きい。一方、六甲アイランド西側は、東側と比較すると浸水深が小さかったものの、コンテナターミナルでは電源施設が高潮によって浸水し、ガントリークレーン等の設備が稼働できない状態となった。

西宮地区では横引きゲート式の陸閘が変形し、堤内地への海水の侵入が認められたが、前浜地区では海岸堤防が防護機能を発揮し、堤内の住宅地の浸水を防いだことが確認された。

高潮・高波による被害は全体として湾奥にあり、高潮による流れと強風により大型船舶、コンテナ、自動車等が漂流し、関西国際空港の連絡橋への衝突や湾奥での様々な被害を増幅した。

5. 災害対応、復旧・復興体制の検証

災害対応、復旧・復興体制の検証を行うために、インタビュー、および、アンケート調査を実施し、各組織の災害対応状況についての調査結果をまとめた。ライフライン企業の災害対応事例としては、強風の影響により大規模な停電被害を経験した関西電力の事例。高潮・高波による浸水と、船舶の衝突により連絡橋の被害を受けた関西国際空港の被害。鉄道事業者として JR 西日本の災害対応を取り上げ、対応状況について明らかにした。関西国際空港については、害対応とレジリエンスの定量化の可能性について航空機の離発着記録を用いて分析を行い、離陸便は着陸便に比べ、台風の進路や状況を見ながら、ぎりぎりまで離陸の可能性を探っていたことが伺え、そのことが空港島内の多数の孤立者を生んだ原因となったことを明らかにした。

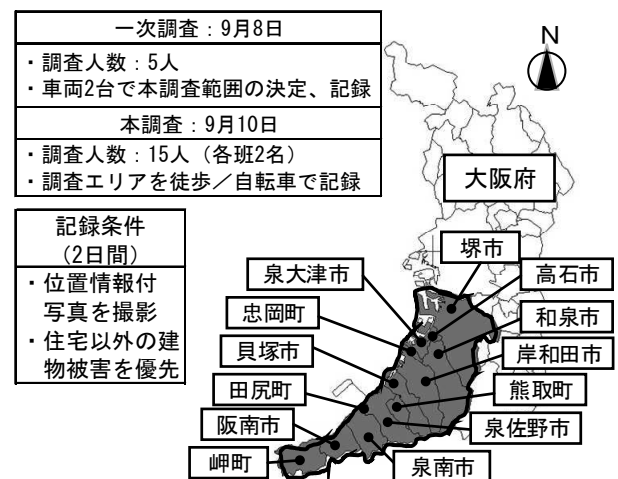


図 56 大阪府南部地域の被害調査概要

今回の台風 21 号の被害を記録し、今後の被害軽減に役立てることを目的とし、調査収集された被害写真を公開型 GIS ヘマッピングした。また、大阪府南部 13 市町職員を対象としたアンケート調査（図 56）を行って、災害対応、復旧・復興体制の検証を行った。その結果、災害に対応しつつ通常業務が停止されなかったことで、人員確保に苦慮した事等が明らかとなった。

産業部門へのアンケート調査では、強風と高潮ハザードがもたらした影響の計量化を目指して、アンケート調査を実施し、物的被害の状況や企業の操業能力に及ぼす影響を分析した。その結果、製造業・非製造業ともに、災害によって生じた生産（操業）能力の低下が大きいほど、回復に要する時間が長くなっていることがわかった。また、製造業に比して

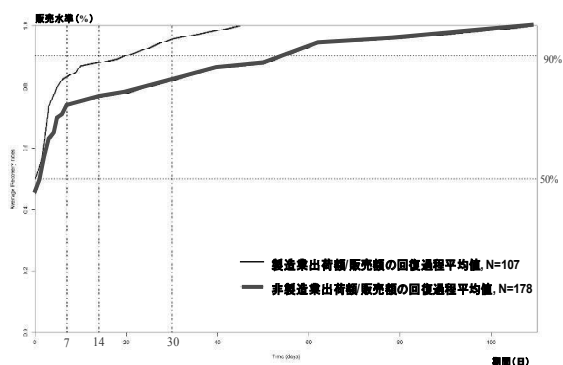


図 57 出荷額・販売額の平均値の回復過程

非製造業の回復により時間がかかっていることが分かった（図 57）。

6. おわりに

平成 30 年台風 21 号の強風・高潮災害に対して行われた調査をもとに、強風および豪雨など、被害発生の気象学的要因、街区における強風被害の空間的分布の解明、現地調査により被害の実態および、自治体、公共団体などの被害統計や強風の観測記録の収集による構造物や人への被害、高潮による水位変化と高波の越波による被害を概観した。

地球温暖化による将来気候のもとで強大な台風の発生頻度の増大が示唆されている今日、今回の台風被害は都市域において繰り返されることが予想される複合災害の典型である。災害後、気象学的立場からの強風・高潮の発生メカニズム、都市部を含む広域で発生した建築物・構造物の被害発生メカニズム、都市沿岸部を含む沿岸部および人工島で発生した高潮被害のメカニズム、などの解明に資する数多くのデータが得られ、今後の防災・減災技術、災害対応、復旧・復興体制の検証などを進める上で極めて重要な情報が得られた。これは、学術的成果のみならず、

わが国の防災・減災のあり方に及ぼすインパクトが極めて大きいと評価できる。これらが将来の災害の低減ならびに安全・安心な社会の達成のための一助になれば幸甚である。

参考文献

土木学会海岸工学委員会 (2018) 2018 年台風 21 号 Jebi による沿岸災害, <http://www.coastal.jp/ja>, 2018 年 9 月 22 日。

森ら (2018) 2018 年台風 21 号 Jebi による沿岸災害調査報告, 土木学会誌 12 月号, 4p.

国土交通省運輸安全委員会, (2018.12) 「船舶事故調査の経過報告について (平成 30 年 12 月 20 日)」

関西電力 (2019) : https://www.kepco.co.jp/souhaiden/pr/2018/pdf/1213_1j_02.pdf, 2019 年 2 月 23 日閲覧

本文中で特に表記のない図、表、写真は全て、平成 30 年度科学研究費助成事業-科研費-特別研究促進費研究「平成 30 年台風 21 号による強風・高潮災害の総合研究」報告書から引用した。

謝 辞

本稿は、平成30年度日本風工学会突発災害調査費および平成30年度科学研究費助成事業-科研費-特別研究促進費研究「平成30年台風21号による強風・高潮災害の総合研究」(丸山 敬：研究代表者, 2019)の助成を受け、災害発生のメカニズムの解明や人的・物的被害の実態解析のための総合研究調査を実施した結果をもとにまとめたものである。調査に際しては、日本風工学会、日本建築学会、土木学会、日本気象学会、日本鋼構造協会などに所属する風工学、建築学、土木工学、気象学、構造工学などの研究者の協力も得て実施された。ここに記して謝意を表す。

硫黄山噴火に伴う河川汚濁水が水稻栽培に与える影響

原田隆大*・山内正仁*・山田真義*・山口隆司**・松田曜子**・丁子哲治***

* 鹿児島工業高等専門学校

** 長岡技術科学大学

*** 前鹿児島工業高等専門学校校長

要 旨

本研究では、利水の安全性確保のために、硫黄山噴気孔近くのえびの橋（赤子川最上流部）から採水した河川水を10万倍まで段階的に希釈し、汚濁水に含まれる成分が水稻栽培に与える影響についてポット試験を実施し、検討した。ポット試験では、根長、地上部乾物重、根乾物重、穂数、籾数、実籾数、玄米収量を調査した。その結果、pHが低く、EC、SS濃度が高い河川水原水を水稻栽培に利用すると苗の生育が急激に悪化すること、河川水を水道水で10倍希釈した試験区2と100倍～10万倍希釈（試験区3～6）及び対照区（試験区7）の間には水稻の生育、収量に顕著な差が見られた。

1. はじめに

2018年4月、250年ぶりに霧島連山・硫黄山で噴火が発生し、川内川、長江川、赤子川では予期せぬ有害成分を含む強酸性の噴出汚濁水により汚染され、1トンを超える魚の死骸が回収されるに至った。また、これらの流域では河川水を利用した稲作が盛んであるが、2018年度の水稲栽培は、環境基準を超えるヒ素などの有害物質が検出されたことを受け、2市1町（宮崎県えびの市、鹿児島県湧水町、伊佐市）の水田853haで稲作が中止された。次年度においても風評被害などを恐れ、自治体で対応が分かれたこともあり、流域全体での稲作再開に至っていない状況にある。

本研究では、利水の安全性確保のために、硫黄山噴気孔近くのえびの橋（赤子川最上流部）から採水した河川水を10万倍まで段階的に希釈し、汚濁水に含まれる成分が水稻栽培に与える影響についてポット試験を実施し、検討した。

2. 試験方法

2.1 河川水の採水及び試験土壌の採取

本試験では、硫黄山から近くのえびの橋で河川水を6回（2018年6月27日から10月3日まで）採水し、pH、EC、SS及び金属・重金属を定量した。また、宮崎県

えびの市向江地区水田土壌を150 kg採取し、2 mm篩に通した後、これらをポット試験に用いた。

2.2 河川水の採水及び試験土壌の採取

本試験では、まず7月10日に1/5,000 aのワグネルポットに水田土壌を2.6 kg（現物：水分率40.1%）ずつ充填後、6月27日に採水した河川水原水（試験区1）、水道水で希釈した河川水（試験区2～試験区6：10倍～10万倍まで5段階に希釈）及び水道水（試験区7：対照区）を各試験区1 L添加した。つぎにポットあたりヒノヒカリの苗を1株（4本）ポット中心に移植し、化学肥料0.8 g（ひかりエース2号（N:P:K 10-18-14））を添加した。栽培開始後は原則湛水状態を維持した。また追肥として8月10日、24日に基肥と同じ化学肥料を0.4 gずつ施肥した。栽培期間中は、分けつ数、草丈を20日間隔で栽培80日（9月28日）まで測定した。収穫は10月26日に行った。収穫後、ポットごとに根長、地上部乾物重、根乾物重、穂数、籾数、実籾数、玄米収量を調査した。また玄米については金属・重金属含有量を調査し、河川汚濁水を水稻栽培に利用することによる影響を対照区（試験区7）と比較した。

3. 試験結果および考察

表-1 えびの橋（赤子川最上流部）で採水した河川水の水質分析結果

分析項目	pH (-)	EC (mS/m)	SS	Cd	As	T-Hg	Se	Cu	Zn	Cr	Pb	F	B
環境基準	6.5-8.5	-	25以下	0.003以下	0.01以下	0.0005以下	0.01以下	-	農業用水基準 (0.5mg/L)	0.05以下	0.01以下	0.8以下	1以下
2018.6.27	1.7	1,094	22	0.0017	0.4	0.0005未満	0.002未満	0.1未満	0.35	0.03	0.032	17	9
2018.7.11	1.1	2,930	1,220	0.0058	1.5	0.0005未満	0.002未満	0.1未満	1.20	0.04	0.12	42	33
2018.8.02	1.5	1,487	96	0.0017	0.7	0.0005未満	0.002未満	0.1未満	0.41	0.02	0.036	17	20
2018.8.18	1.4	1,246	120	0.0036	1.0	0.0005未満	0.002未満	0.1未満	0.83	0.05	0.072	23	37
2018.9.6	1.8	742	85	0.0011	0.3	0.0005未満	0.002未満	0.1未満	0.36	0.02	0.015	6.4	26
2018.10.3	1.8	537	63	0.0007	0.2	0.0005未満	0.002未満	0.1未満	0.17	0.02	0.01	4.2	6.7

表-1にえびの橋で採水した河川水（原水）の水質分析結果を示す。全体的にpHは極端に低く、1.1～1.8の範囲にあった。EC、SSは7月11日の河川水で2,930mS/m、1,220 mg/Lであったが、それ以降は減少傾向にあった。金属及び重金属含有量は、As、Pb、F、Bが全ての試料で環境基準値を上回った。表-2に各試験区における河川水、河川希釈水及び水道水のポット土壌への1日平均灌水量、平均累積灌水量を示す。1日平均灌水量は栽培24日目～43日目が多く、その後は徐々に減少した。ポットあたりの平均累積灌水量は13.8～15.4 L/ポットであった。なお、試験区1については、7月18日（栽培8日目）に7月11日に採水した河川水添加後、徐々にポット土壌表面からの水位の変化が少なくなり、7月23日に灌水を停止した。また、試験区2についても9月13日以降、ポット土壌表面の水位変化が小さく、灌水量が低下した。表-3に水稻の生育調査結果を示す。最高分けつ数（栽培40日目（8月19日））、草丈、根長及び根乾物重に試験区間の有意差は認められなかった（写真1参照）。根長、根乾物重については、試験区内でのバラツキが大きかった。これは植物根がポット全体に周り、土壌と分離する際、細根が切断されたりしたことが影響していると考えられる。地上部乾物重については、試験区2とその他の試験区で有意差が認められた。なお、試験区1については上述したように、河川水が土壌浸透し難くなり、急激に苗の生育も悪化し、7月28日（栽培18日目）に枯死した（写真2参照）。この期間にポットに灌水した河川水はSS濃度が非常に高い。またECも極端に高い。このことから、ポット土壌の間隙がSSにより塞がったり、浸透圧が増加したりしたことで、根の吸水障害により根腐れを起こし、枯死したと考えられる。表-4に水稻の収量構成要素の結果を示す。ポットあたりの穂数、粒数に有意差は認められなかったが、実粒数、玄米重量は試験区2と試験区3～試験区7で有意差が認められた。試験区7の実粒数、玄米重量はそれぞれ528.8±4.91粒、8.5±0.52gと河川希釈水を利用した試験区3～試験区6よりもやや多かったが、統計的有意性はなかった。表-5に玄米に含まれる金属、重金属含有量の分析結果を示す。Asは試

表-2 栽培期間における1日平均灌水量、平均累積灌水量

試験区	河川水採水日						平均累積 灌水量
	6月27日	7月11日	8月2日	8月18日	9月6日	10月3日	
	7/10-7/17 (8日)	7/18-8/1 (15日)	8/2-8/21 (20日)	8/22-9/12 (22日)	9/13-10/2 (20日)	10/3-10/11 (9日)	
	1日平均灌水量(L/ポット/日)						(L/ポット)
1 河川水原水	0.150	0.067	-	-	-	-	2.2
2 10倍希釈	0.166	0.100	0.339	0.167	0.008	0.044	13.831
3 100倍希釈	0.166	0.112	0.326	0.169	0.065	0.061	15.095
4 1,000倍希釈	0.163	0.101	0.308	0.198	0.070	0.075	15.396
5 10,000倍希釈	0.156	0.105	0.299	0.138	0.078	0.072	14.025
6 100,000倍希釈	0.156	0.109	0.306	0.164	0.080	0.072	14.858
7 対照区(BL)	0.194	0.105	0.296	0.170	0.079	0.056	14.875

表-3 水稻の生育調査結果

試験区	最高 分けつ数 (-)	草丈 (cm)	根長 (cm)	地上部 乾物重 (g/ポット)	根乾物重 (g/ポット)
2 10倍希釈	19.0±1.22	80.3±4.11	29.9±4.90	18.7±0.55a	12.0±1.82
3 100倍希釈	17.5±2.29	79.4±2.25	32.4±5.46	23.5±0.99b	14.7±2.29
4 1,000倍希釈	14.5±2.29	80.9±1.37	33.7±5.25	22.9±0.63b	13.9±1.47
5 10,000倍希釈	15.5±3.28	81.1±1.76	31.5±1.73	23.2±1.79b	14.7±0.79
6 100,000倍希釈	16.5±1.50	78.3±5.21	39.5±3.82	23.7±1.36b	16.2±1.80
7 対照区(BL)	15.5±1.80	80.4±5.27	38.4±3.59	24.0±0.87b	13.9±1.43

平均値±標準偏差を示す。同一列の異なるアルファベット間にはTukeyの多重比較により5%水準で有意差あり(N=4)。

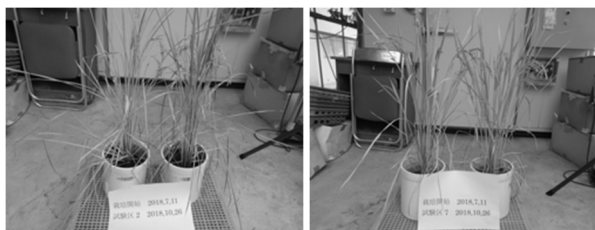
写真1 収穫前の生育状況
左：試験区2 右：試験区7

写真2 枯死した水稻試験区1

験区2で 0.40 ± 0.11 mg/kgと最も高かったが、試験区3では試験区7と同様に低く、試験区5では試験区1、試験区7と有意差がないなど希釈倍率に関係なく $0.14 \sim 0.40$ mg/kgの範囲で変動した。Cd, Asは水田の水管理により玄米への吸収を抑制可能なことが報告されている（荒尾，2010）。しかしながら，Cdは湛水管理で減少させることが可能な一方，Asは間断灌漑を行う必要があり，両者には負の相関がある（荒尾，2010）。本試験の水管理は湛水管理に近い状態で栽培を実施したため，全ての試験区でAsが検出されたと推察される。厚生労働省は米（玄米及び精米）のCdについては 0.4 mg/kg以下の規格基準を示している。一方，Asについては玄米で 0.35 mg/kg（無機ヒ素），精米で 0.2 mg/kg（無機ヒ素）のCodex基準がある。また玄米に含まれる総ヒ素の92％は毒性の強い無機ヒ素である（農林水産省HP）。本試験では試験区2，試験区5において基準値と同等，それ以上の無機ヒ素を含む可能性があると考えられる。

川内川上流部の宮崎県えびの市，鹿児島県湧水町及び伊佐市のそれぞれの観測地点の年平均流量は豊水流量で $18.8 \sim 37.3$ m³/s，平水流量で $12.4 \sim 23.8$ m³/s，低水流量で $9.6 \sim 17.9$ m³/s（2015-2017国土交通省 水文水質データ参照）である。採水場所のえびの橋の流量は 0.23 m³/s（実測）であったことから，川内川では40倍～160倍程度希釈されると考えられる。本試験結果では河川水を10倍希釈した試験区2で水稻の生育，収量に顕著な差が見られた。また，玄米中のAs量も試験区2と試験区5で有意差が見られないなど，河川希釈水を利用した試験区は試験区7と比較して全体的に高くなる傾向にあった。これらのことから，2018年度，河川水を水稻栽培利用していた場合，水稻の生育，収量構成要素及び玄米への重金属（As）の濃縮など少なからず影響を受けていたと推察される。

4. おわりに

本研究では，硫黄山噴火に伴い発生した汚濁水が水稻栽培に与える影響をポット試験で調査し，以下の知見を得た。

1) pHが低く，EC，SS濃度が高い河川水原水を水稻栽培に利用すると苗の生育が急激に悪化した。これは河川水の塩類濃度の高まりによる浸透圧の変化や微粒懸濁物による水田土壌の透水性，通気性の悪化が影響していると考えられた。

2) 河川水を水道水で10倍希釈した試験区2と100倍～

表-4 水稻の収量構成要素

試験区	穂数 (本/ポット)	籾数 (粒/ポット)	実籾数* (粒/ポット)	玄米重量** (g/ポット)
2 10倍希釈	15.0 ± 1.28	484.3 ± 8.32	342.3 ± 6.32 b	3.7 ± 0.66 b
3 100倍希釈	14.5 ± 0.76	448.0 ± 9.08	433.5 ± 8.92 a	7.8 ± 0.59 a
4 1,000倍希釈	12.5 ± 1.00	472.5 ± 2.53	462.0 ± 3.20 a	7.4 ± 0.47 a
5 10,000倍希釈	12.8 ± 0.98	451.8 ± 7.25	432.0 ± 7.19 a	7.6 ± 0.79 a
6 100,000倍希釈	14.0 ± 1.28	483.8 ± 4.18	454.0 ± 4.98 a	7.3 ± 0.78 a
7 対照区(BL)	13.3 ± 1.23	537.5 ± 4.86	528.8 ± 4.91 a	8.5 ± 0.52 a

同一列の異なるアルファベット間にはTukeyの多重比較により有意差あり(N=4)。* P<0.05 **P<0.01

表-5 玄米に含まれる金属・重金属分析結果

試験区	Cd	As	Pb	Cr	Zn	B	F
(mg/kg)							
2 10倍希釈	N.D.	0.40 ± 0.11 a	N.D.	0.18 ± 0.13	25.0 ± 2.76 b	3.65 ± 0.69	N.D.
3 100倍希釈	N.D.	0.14 ± 0.04 b	N.D.	N.D.	30.3 ± 2.07 ab	1.68 ± 0.45	N.D.
4 1,000倍希釈	N.D.	0.24 ± 0.03 bc	N.D.	0.30 ± 0.17	34.5 ± 1.54 a	1.17 ± 0.46	N.D.
5 10,000倍希釈	N.D.	0.30 ± 0.11 ac	N.D.	N.D.	32.5 ± 1.82 ab	1.07 ± 0.50	N.D.
6 100,000倍希釈	N.D.	0.23 ± 0.04 bc	N.D.	N.D.	36.0 ± 1.07 a	0.56 ± 0.55	N.D.
7 対照区(BL)	N.D.	0.15 ± 0.04 bc	N.D.	0.65 ± 0.15	37.5 ± 1.44 a	0.50 ± 0.29	N.D.

同一列の異なるアルファベット間にはTukeyの多重比較により5%水準で有意差あり(N=4)。

10万倍希釈（試験区3～6）及び対照区（試験区7）の間には水稻の生育，収量に顕著な差が見られた。また，玄米中の総As量は試験区2で 0.40 ± 0.11 mg/kg，試験区5で 0.30 ± 0.11 mg/kgであり，バラツキも大きい。試料によってはCodex基準値（ 0.35 mg/kg）と同等，それ以上の無機ヒ素を含む可能性があると考えられた。

3) 赤子川最上流部の流量，川内川の観測地点の年平均流量から，川内川上流における試験区を推定すると試験区2～4に相当すると考えられ，2018年度，河川水を水稻栽培利用していた場合，水稻の生育，収量構成要素及び玄米への重金属(As)の濃縮など少なからず影響を受けていたと推察された。

謝 辞

米盛誠心育成会研究助成事業及び京都大学防災研究所自然災害研究協議会の助成を受けて実施した。

参考文献

- 1) 荒尾知人：水稻におけるカドミウムとヒ素の吸収を管理する技術開発，土・水研究会資料 27, 1-7, 農業環境技術研究所, 2010.
- 2) 農林水産省：「平静24年度 国産玄米及び精米中のヒ素の含有実態調査」の結果について，<http://www.maff.go.jp/j/press/syouan/nouan/140221.html> (2018.1.25閲覧)。

持続可能な防災まちづくりと防災人材育成に関する研究

佐藤 健*

* 東北大学災害科学国際研究所

要 旨

防災まちづくりの活動に取り組みながら、次世代を担う将来の地域人材を育成する活動モデルの確立が社会的なニーズとなっている。まちづくり活動の中に防災活動を位置づけ、多様な人材の参画と次世代を担う人材の育成に取り組んでいる地域コミュニティの事例調査と分析を行い、持続可能な防災活動のロールモデルについて探究を行った。

1. はじめに

防災を含む多様なまちづくりに関する具体的な活動に取り組みながら、次世代を担う将来の地域人材を育成する地域活動モデルの確立は、第3回国連防災世界会議による仙台防災枠組の実現、および世界防災フォーラム／防災ダボス会議@仙台による実行委員長サマリーにも調和した重要な方向性である。

そこで、まちづくり活動の中に防災活動を位置づけ、多様な人材の参画と次世代を担う人材の育成に取り組んでいる地域コミュニティに着目し、持続可能な防災活動のロールモデルについて探究することを研究目的とし、地域防災実践型共同研究「持続可能な防災まちづくりと防災人材育成に関する研究」に取り組んできた。本報告は主な研究成果を報告するものである。

2. 研究方法と実施体制

2.1 研究方法

事例調査の方法を採用する。調査対象とする事例地は既往の研究や最新の動向をもとにピックアップする。事例地の訪問や現地での活動参画を通して、地域活動モデルを丹念に分析し、持続可能な防災活動のロールモデルとしてのエッセンスを抽出する。

2.2 実施体制

研究の実施にあたっては、自然災害研究協議会東北地区部会と東北大学災害科学国際研究所防災教育国際協働センターの研究者コミュニティが中心となり、自治体関係者や地域防災リーダー、学校教員、一般市民とも連携した実施体制を構築した（表1）。

表1 実施体制

氏名	所属・職名
佐藤 健 (研究代表)	東北大学災害科学国際研究所・教授
風間基樹	東北大学大学院工学研究科・教授
河井 正	東北大学大学院工学研究科・准教授
柴山明寛	東北大学災害科学国際研究所・准教授
佐藤翔輔	東北大学災害科学国際研究所・准教授
定池祐季	東北大学災害科学国際研究所・助教
増田 聡	東北大学大学院経済学研究科・教授
片岡俊一	弘前大学理工学部・教授
松富英夫	秋田大学理工学部・教授
水田敏彦	秋田大学地方創生センター・教授
鎌滝孝信	秋田大学地方創生センター・准教授
村山良之	山形大学大学院教育実践研究科・教授
山本英和	岩手大学理工学部・准教授
千葉則行	東北工業大学工学部・教授
中村 晋	日本大学工学部・教授
小田隆史	宮城教育大学・准教授
飯藤将之	仙台高等専門学校・教授
桜井愛子	東洋英和女学院大学・准教授
林田由那	早稲田大学教育・総合科学学術院・助手
藤田悦生	宮城県危機対策課地域防災班・主幹
伊勢みゆき	NPO法人まなびのたねネットワーク・代表理事
大内幸子	仙台市地域防災リーダー
今野 均	仙台市片平地区まちづくり会・会長
武山 浩	グリーンキャピタル長町Ⅱ・理事長
木村慎吾	仙台市立片平丁小学校・教諭（防災主任）
溝井貴久	仙台市片平地区まちづくり会・企画委員

注記）表中の所属・役職は平成30年度末時点のもの

3. 調査結果

3.1 横浜市立北綱島小学校の事例

(1) コミュニティ・スクール

コミュニティ・スクール（学校運営協議会制度）は、学校と保護者や地域の関係者がともに知恵を出し合い、学校運営に意見を反映させることで、一緒に協働しながら子どもたちの豊かな成長を支え「地域とともにある学校づくり」を進める法律（地教行法第47条の6）に基づいた仕組みである。

コミュニティ・スクールの主な役割は、次の通り。

- 校長の作成する学校運営の基本方針を承認する。
- 学校運営に関する意見を教育委員会または校長に述べる。
- 教職員の任用に関して教育委員会に意見が述べられる。

横浜市は、平成17年5月に東山田中学校に学校運営協議会（以降、コミュニティ・スクールと呼ぶ）を設置してから、順次設置を推進し、平成31年4月1日現在で設置校数は210校（172協議会）となっている（横浜市教育委員会、2019）。その中で、調査対象である北綱島小学校には平成21年4月1日にコミュニティ・スクールが設置された。

(2) 学校・家庭・地域連携に基づく防災教育

コミュニティ・スクールの仕組みを活用した安全教育の取り組みが注目されはじめている（中迫ら、2018）。そのような中で北綱島小学校は、平成23年度に「地域の自然と社会への理解を育て、地域・学校・家庭が連携して推進する防災教育」を研究主題とした実践研究を先駆けて行っている。平成23年第3回学校運営協議会において、「北綱島小学校区地域・学校・家庭連携防災教育推進委員会」も立ち上げ実践研究を推進した（横浜市立北綱島小学校、2012）。

また、平成24年度には、内閣府の防災教育チャレンジプランの実践校として、「学校、地域、保護者が地域の災害想定を共有して取り組む防災教育の推進」に取り組むなど、防災教育の先進校である（内閣府防災教育チャレンジプラン、2013）。コミュニティ・スクールの全てが防災教育の推進に取り組んでいるわけではない中で、北綱島小学校の地域防災拠点訓練を含む多様な防災教育の取り組みは多くの示唆を与える（佐藤、2013）。

さらに、北綱島小学校の中期学校経営方針において、「学校、家庭、地域の連携のもとに、災害を中心とした様々な危険から身を守る防災教育の充実を図ります。」といった学校経営中期取組目標が掲げられ、同時に8つある重点取組分野のうちの2つが表2に示すような学校、地域、保護者の連携に基づいた

防災教育の推進に関する取り組みとして位置付けられている（横浜市立北綱島小学校、2018）。

表2 重点取組分野（一部抜粋）

重点取組分野	取組目標
地域連携	• 学校運営協議会を通して、地域、家庭との連携を強化し、共に防災教育や地域の教育力を活用した学習活動を充実させ、地域に開かれた学校づくりを推進する。
安全防災教育	• 在校時間帯の災害に適切な対応ができる体制作りと、訓練の質の向上を図る。 • 学校、家庭、地域の連携のもと、「きたつな防災プラン」をPDCAサイクルで見直し、様々な危険から身を守る防災教育の充実を図る。

(3) 地域防災拠点訓練

平成30年度に開催された北綱島小学校の地域防災拠点訓練（図1、写真1）を通して、活動モデルの特徴を整理する。

北綱島小学校の学校行事にも位置付けられた地域防災拠点訓練の参加者は、北綱島小学校の全校児童とその保護者、学校・地域（自治会・町内会）・区役所で構成された「地域防災拠点運営委員会」委員、北綱島小学校の全教職員、学校区の地域住民等である。その中でも地域防災拠点訓練を主導し、訓練指導者となっているのは、消防職員や区職員ではなく写真1に見られるように地域防災拠点運営委員会の地域住民（写真1でウィンドブレーカを着用している者）である。一般の地域住民であるため、訓練指導者となるためには、事前に知識と技能を身に付ける必要があることは言うまでもない。

写真1(d)は、北綱島小地域防災拠点運営委員会副会長のK氏が訓練参加者に対して、「どうしても避難が必要な時だけ避難所に来て頂き、できるだけ在宅避難できるように各世帯で備えて下さい」とレクチャーしている様子である。写真1(f)は、地下式消火栓の操作訓練の様子である。消火栓の蓋を開け、吐水口にスタンドパイプを結合し、スタンドパイプにホースを結合し、放水弁にスピンドルドライバーを結合して開栓し、実際に放水を開始する一連の操作の全てを消防職員や消防団員ではなく、地域防災拠点運営委員会の地域住民の女性が行っている。写真1(m)は、バケツリレーによる初期消火訓練の様子である。地域住民と協力して防災活動に取り組む上学年児童の姿を低学年児童が将来の自分の姿と重ね合わせながら見学している。写真1(n)は、教室での振り返り活動の場面である。北綱島小学校の卒業生の中学生1名と高校生1名が来校し、自分の後輩となる児童に防災の取り組みの重要性についての講話を行った。

(4) 活動モデルの考察

コミュニティ・スクールである北綱島小学校の調査結果に基づき、持続可能な防災まちづくりと防災人材育成のロールモデルとなり得る要因を整理する。

- コミュニティ・スクールのような仕組みがない一般の学校の場合、管理職の異動に伴う学校経営方針の大きな変更により、防災の取り組みに限らず、学校・家庭・地域の連携推進が継続される保証はない。
- 一方で、北綱島小学校のように学校の経営方針や重点取組目標に地域連携や防災教育の推進が掲げられると、学校ぐるみの取り組みとして活動しやすい環境が整う。
- 学校の経営方針や重点取組目標に学校・家庭・地域が連携した防災活動を掲げ、コミュニティ・スクールの仕組みを活用して実践・展開する北綱島小学校の活動モデルは、持続可能な防災まちづくりと防災人材育成の両立を図ることができるロールモデルである。

コミュニティ・スクールが先行して学校・家庭・地域が連携した防災教育の実践を蓄積し、高度化していくことは、一般の学校への普及と展開にとっても有益であると考えられた。なお、北綱島小学校は、コミュニティ・スクールを通じたこれまでの安全防災教育や地域の教育力を活用した学習活動の実践が評価され、平成30年度「地域学校協働活動」推進に係る文部科学大臣表彰を受賞したことを付記する。

地域防災拠点実践訓練

2018.10.21 (日)
(雨天決行)
北綱島小学校
8:30発災
9:00受入開始
9:15開会

作業に適した服装で参加ください。
上履きをご持参ください！

北綱島小学校地域防災拠点運営委員会

訓練内容・プログラム

8:30 震度5強以上の地震が発生！
9:00 拠点受付
9:15 開会式
9:30 円陣を組んで地域ミーティング
9:40 訓練開始 2班に分かれ訓練開始 30分で交代

◆運動場 実践訓練
・救出・搬送・初期消火・トイレ組立 実践訓練
◆体育館 実践訓練
・防災よこはまDVD視聴

11:00 6年生と保護者によるバケツリレー実践訓練
11:10 閉会式 講評

**自分たちの街は 自分たちで守る！
地域全員で 生き抜く！**

図1 北綱島小学校地域防災拠点訓練の開催案内



(a) 北綱島小学校への避難



(b) 地域防災拠点の受付



(c) 防災訓練の開会



(d) 地域防災拠点運営委員



(e) 救出訓練



(f) 消火栓操作訓練



(g) 給水栓操作訓練



(h) インタビュー活動



(i) 搬送訓練（保護者）



(j) 搬送訓練（児童）



(k) 車椅子体験



(l) 身体障がいの模擬体験



(m) バケツリレー訓練



(n) 教室での振り返り活動

写真1 北綱島小学校地域防災拠点訓練の様子

3.2 仙台市片平地区まちづくり会の事例

(1) 片平地区まちづくり会

仙台市内の片平地区連合町内会が中心となったコミュニティ（片平地区まちづくり会）は、まちづくり活動の中に防災活動を位置づけ、多様な人材の参画と若い世代の人材育成に取り組んでいる。片平地区まちづくり会による人材育成に関する代表的な取り組みは、「片平子どもまちづくり隊」の結成とその活動を片平地区の大人たちが全面的に支援していることである。具体的な活動の一つとして、2016年度から継続開催している「防災×宝探しゲーム」である（今野，2017；桜井ら，2017）。2018年度に開催された第3回宝探しゲーム（図2）を通して、活動モデルの特徴を整理する。



図2 第3回宝探しゲームの開催案内

(2) 防災×宝探しゲーム

この活動は、片平まちづくり会の大人がガイド役となり、片平地区にある豊かな自然や歴史・文化、防災資源等を、宝探しゲーム風のまち歩きをしながら片平地区の子どもたちに教える地域活動である。この活動に参加し、防災に関する確認テストに合格した子どもたちは、片平地区まちづくり会によって「三日月団」として認定証が授与される。片平地区まちづくり会は、三日月団の子どもたちに「仙台市地域防災リーダー（SBL）」をサポートする次世代の地域防災人材となることを期待している。

この活動の原型は、「リアル宝探し」の体験型ゲーム（タカラッシュ，2016）であるが、防災の要素を融合させたプログラムとして、平成28年度内閣府地区防災計画モデル事業で始めて取り組んだ。モデル事業が終了した後も片平地区まちづくり会が独自の工夫を重ね、3年連続で継続開催している。

発見した宝箱（写真2(e)）の中には、次の宝箱の場所を暗示するクイズ問題（写真2(f)）が入っており、解くことで前に進むことができる。宝箱の場所は片平地区の歴史資源や防災資源等がある場所として片平地区まちづくり会によって選ばれる。宝探しの活動には、片平地区在住の仙台市地域防災リーダー（SBL）等の大人が同行し、宝箱設置場所において、片平地区の歴史や防災に関することが子どもたちに解説される。ゴールポイントでは、子どもたちに対して防災問題が出題され（写真2(g)）、合格することで「三日月団」として認定証が授与される（写真2(h)）。

なお、三日月団の認定証には、片平地区まちづくり会の大人たちから子どもたちに伝えたい心得が記載されている（表3）。第四条と第五条はまちづくり活動の中に防災活動を位置づけている片平地区まちづくり会ならではの重要な心得となっている。



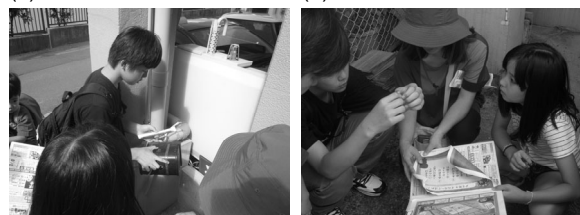
(a) 運営スタッフ打合せ

(b) 参加児童の集合



(c) 氣勢をあげる会長

(d) 宝探しスタート



(e) 宝箱発見

(f) 宝探しクイズ



(g) 防災問題にチャレンジ (h) 三日月団心得の伝授

写真2 防災×宝探しゲームの様子

表3 三日月団の心得

第一条	自分の身は自分で守るべし
第二条	みんなが安心して暮らせるよう備えるべし
第三条	仲間との協力を惜しまぬ心を育むべし
第四条	地域の自然・文化・歴史を尊ぶべし
第五条	後世に誇れるまちづくりを心がけるべし

(3) 片平子どもまちづくり隊

2015年、片平地区の子どもたちが通学する片平丁小学校6年生の総合的な学習の時間において、片平地区の魅力や大人たちの地域活動に接する機会があった。この学習に取り組んだ子どもたちの中の有志が、「もっと地域のことが知りたい」、「自分たちでもできることをしたい」と、学校以外でも地域の大人と一緒に自発的な地域活動に参画するようになった。この子どもたちが中心となり、「片平子どもまちづくり隊」を結成し、片平地区まちづくり会はそれを正式な部会として位置付けた。子どもまちづくり隊は毎月1回、定例会を開催し、自主運営企画等について議論や活動を重ねている。自分の存在が周りの人に役立っている自己有用感を持ちながら仲間と協力した魅力的な活動が展開されている。

2017年の世界防災フォーラム／防災ダボス会議@仙台において、中学2年生に成長した子どもまちづくり隊の子どもたちが、それまで取り組んできた防災を含むまちづくり活動について発表した（Sato et al. (2018)）。その子どもたちは現在は高校生になり、次世代の防災人材に少しずつ近づいてきている。

(4) 活動モデルの考察

片平地区まちづくり会が取り組んでいる防災人材育成のポイントを表4に示す（Sato et al. (2018)）。この中に、家庭、地域、関係機関等との連携・協働による防災教育の推進にとっても有効かつ持続可能なロールモデルとして多くの示唆を含んでいる（佐藤, 2019）。

- 地域の大人が学校や地域のために積極的に活動すること。このような地域の大人たちの姿を見ている子どもたちの中から将来の良き町衆が育まれる好循環が生まれる。
- 地域のために役立ちたいとする子どもたちによる地域貢献の意欲を地域の大人が活かすことで、子どもたちの自己有用感と郷土愛を育むことにつながる。

片平子どもまちづくり隊が持つ地域に対する貢献意欲と、その意欲を片平まちづくり会の大人が積極的に活かしている片平地区の防災まちづくり活動の中に、コミュニティベースの防災活動の持続可能性を見いだすことができる。

表4 防災人材育成のポイント

◎	防災をまちづくりの全体計画に取り込むこと
◎	地域を好きになるために楽しんで取り組むこと
◎	大人たちが地域を支えている姿を見せること
◎	学校など教育機関と協働して継続できる仕組みをつくること
◎	子どもたちに「努力すればできる」という達成感を持たせること

4. 探究の深化と情報の共有・発信

2018年10月8日、日本自然災害学会、京都大学防災研究所、東北大学災害科学国際研究所、自然災害研究協議会東北地区部会の共同主催、防災研究協会ほかの後援により、仙台市中小企業活性化センター5階多目的ホールにおいて、平成30年度日本自然災害学会オープン・フォーラム「震災の伝承と防災の未来～被災地で向き合う「災害と教育」～」が開催された。本フォーラムは、本研究課題である「持続可能な防災まちづくりと防災人材育成に関する研究」を深化するとともに、情報共有と発信の機会として研究代表者が中心となって企画した（図3）。フォーラムには、日本自然災害学会第37回学術講演会の参加者をはじめ、学校防災や地域防災に関わる実践者や研究者等、約180名が参加した。

オープン・フォーラムの前半は、中学生と高校生による防災学習・研究成果のポスター発表（7校・10発表）があった。後半は、フォーラム全体のテーマのもとパネルディスカッションが行われ、東日本大震災から7年半が経過した岩手、宮城、福島における復興教育、防災教育、放射線教育の現状と課題を共有し、防災の未来、災害に強い未来の地域づくりに向けた教育の役割が議論された。パネリストを表5に示す。オープン・フォーラムの議論の詳細は、柴山（2019）にまとめられているが、パネリストによる発言のポイントを抜粋して表6に示す。

コーディネータ（研究代表者）は、今後の震災伝承や防災教育を考えた場合、学校と地域との関係性という意味での距離を縮めることや、一方的な支援ではなく協働すること、地域のために役立ちたいとする学ぶ意欲を持つ子どもたちに対して模範を示すべき大人の活動が重要かつ責任が重いことを述べた。

最後に、中学生・高校生のポスター発表に対するオープン・フォーラム参加者の投票結果に基づいた優秀発表賞の授与が行われた。受賞校は、気仙沼市立階上中学校、石巻市立桃生中学校、宮城県石巻西高等学校、宮城県仙台二華高等学校Aとなった。東日本大震災の被災地において地域に根ざして展開され

ている復興教育・防災教育（小野寺ら，2017；桜井ら，2019）の実践校が高い評価を得た。

表5 パネリスト

氏名	所属・職名
森本晋也	岩手大学大学院教育学研究科・准教授
佐藤公治	宮城県南三陸町立歌津中学校・主幹教諭
吉川武彦	福島県相馬郡飯館村立草野・飯樋・白石小学校校長／福島県相馬郡飯館村立まていの里のこども園長
大内幸子※	仙台市地域防災リーダー
伊勢みゆき※	NPO法人まなびのたねネットワーク・代表理事
桜井愛子※	東洋英和女学院大学・准教授
佐藤 健※※	東北大学災害科学国際研究所・教授

注記）※印は本研究課題の研究分担者を示す。※※印は本研究課題の研究代表者およびパネルディスカッションのコーディネータを示す。

表6 パネリストによる発言ポイント（抜粋）

【森本晋也】 震災前の釜石市立釜石東中学校で防災教育を受け、災害にあった当時の生徒に対するインタビュー調査から、「事実や現実を実感、体感できる学びを通し、知識と融合していくこと、そして、自ら主体的に学習し、それを家庭や地域で学んでいくことが大切なポイントである」とわかってきた。地域が学校をつくり、学校が地域をつくっていくような相互関係がある。
【佐藤公治】 生徒が主体的に取り組む避難所運営訓練を実践している。中学生が中学生としての訓練をするのではなく、生徒は避難所運営を行う大人の設定とし、一部の教職員や訓練に参加する大人は、全て仮想の避難者役となる。生徒は、避難所で発生する様々な問題に対して解決方法を考えるロールプレイング形式の体験型学習に取り組むことになる。
【吉川武彦】 飯館村は東日本大震災の発生で全村避難を余儀なくされた。平成30年4月1日、村内の新しい校舎でこども園の開園、小・中学校の開校式を迎えることができた。教育目標は、園・小・中合わせて「より良い未来を自分たちの力でつくれることができる子ども」としている。避難指示の7年間、村に住むことができなかったため、子どもたちが未来をつくっていくことを掲げている。
【大内幸子】 福住町は水害の経験があるため、地域の災害の歴史を学校の新しい管理職が着任する度に根気強く伝えるようにしている。学校と地域との合同防災訓練の際、地元の中学生に対して、「次の災害の時はあなたがまちを守るのよ」と話している。未来のまちづくりのために、地域の大人たちが防災活動に真剣に取り組んでいる姿を子どもたちに見せていく必要がある。
【伊勢みゆき】 学校教育支援と社会教育支援を通した青少年育成、市民が育つ地域社会づくりに寄与することを活動目的としている。どんな切り口であっても、大事なことは「主体的な人を育てる」ということだと感じている。学校や教育委員会などから支援要請を受けても、依頼者とアイディアを出し合いながら一緒に学び合いの場をつくるということを大事にしている。
【桜井愛子】 震災発生から間もない頃から石巻市内の学校において復興教育に関わっている。復旧・復興の段階から始まった教育プログラムは、自分たちの地域がどのような災害を受けやすい地域なのか、過去の災害履歴を学び、地域の理解を深めていく防災教育プログラムに発展してきている。ポスター発表した石巻市立桃生中学校の学習の取り組みは、展開事例の一つである。

図3 オープン・フォーラムの開催案内



(a) パネル討論 (b) ポスター発表会場
(c) ポスター発表表彰式 (d) エクスカーション
写真3 オープン・フォーラムの様子

5. おわりに

まちづくり活動の中に防災活動を位置づけ、多様な人材の参画と次世代を担う人材の育成に取り組んでいる地域コミュニティに着目し、持続可能な防災活動のモデルについて事例調査を実施した。

その結果、学校の経営方針や重点取組目標に学校・家庭・地域が連携した防災活動を掲げ、コミュニティ・スクールの仕組みを活用した北綱島小学校の活動モデルは、持続可能な防災まちづくりと防災人材育成のロールモデルであると考えられた。また、片平子どもまちづくり隊が持つ地域貢献意欲と、そ

の意欲を片平まちづくり会の大人が積極的に活かしている片平地区のまちづくり活動の中に、防災活動の持続可能性を見いだすことができた。

最後に、表7に示すような日本安全教育学会第20回山形大会と本研究課題との連携シンポジウム「防災教育は学校と地域が協働してこそ多様な価値が創造される」を企画し、引き続いて探究を深化させる予定である（佐藤，2019）。

表7 パネリスト

氏名	所属・職名
大内幸子※	仙台市地域防災リーダー
鷺山龍太郎	横浜市立北綱島小学校・元校長
二藤部由美	山形県中山町立中山中学校・教諭
藤田大輔	大阪教育大学教育学部・教授
森本晋也	文部科学省総合教育政策局・安全教育調査官
佐藤 健※※	東北大学災害科学国際研究所・教授

注記）※印は本研究課題の研究分担者を示す。※※印は本研究課題の研究代表者およびパネルディスカッションのコーディネータを示す。

謝 辞

本研究の実施にあたり、京都大学防災研究所の岩田知孝教授、矢守克也教授には、有益なアドバイスを頂き、研究分担者には、個別の調査活動や調査結果に基づいた分析において、多大な協力や助言を頂いた。また、横浜市立北綱島小学校の事例調査にあたっては、鷺山龍太郎元校長や昆しのぶ校長、北綱島小学校地域防災拠点運営委員会の垣中祐二副会長に、片平地区まちづくり会の事例調査にあたっては、今野均会長をはじめとした片平地区まちづくり会の関係各位に多大な協力を頂いた。さらに、オープン・フォーラムの企画運営にあたっては、東北大学大学院工学研究科土木工学専攻の風間基樹教授（自然災害研究協議会東北地区部会長）、河井正准教授、加村晃良助教、東北大学災害科学国際研究所の柴山明寛准教授、佐藤翔輔准教授、定池祐季助教に多大な協力を頂いた。関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

横浜市教育委員会（2019）：学校地域連携推進 <https://www.city.yokohama.lg.jp/kurashi/kosodate-kyoiku/kyoiku/sesaku/chiikirenkei/gakkoushien.html>（2019年8月16日閲覧）
中迫由実・瀬渡章子（2018）：小学校における防犯教育に対する取組みの実態について－全国のコミュニティスクールを対象として－，安全教育学研究，

第17号，第2号，pp.25-32.

横浜市立北綱島小学校（2012）：研究主題「地域と自然と社会への理解を育て、地域・学校・家庭が連携して推進する防災教育」，平成23年度学校運営協議会設置校（コミュニティスクール）防災教育実践研究報告

内閣府防災教育チャレンジプラン（2013）：2012年度実践団体の報告（一般枠）横浜市立北綱島小学校 <http://www.bosai-study.net/2012houkoku/plan.php?type=1&no=6>（2019年8月16日閲覧）

横浜市立北綱島小学校（2018）：平成30年度版中学校経営方針（平成28～30年度） <https://www.edu.city.yokohama.lg.jp/school/es/kitatsunashima/index.cfm/1,1741,c,html/1741/20180529-184035.pdf>（2019年8月16日閲覧）

佐藤 健（2013）：横浜市立北綱島小学校における学校と家庭・地域との連携に基づく防災訓練，日本安全教育学会第14回浦安大会講演予稿集・プログラム，pp.52-53.

今野 均（2017）：片平流防災まちづくり，地区防災計画フォーラム2017，pp.9-13.

桜井愛子・佐藤 健（2017）：持続発展可能な地区防災活動の推進に関する考察－仙台市片平地区の事例を踏まえて－，地区防災計画学会誌，第9号，pp.25-26.

タカラッシュ（2016）：リアル体験型宝探しゲームを活用した防災イベントのご提案（内閣府地区防災計画モデル事業（平成28年度）資料）

Sato, T., Sakurai, A., Sadaike, Y., Konno, H., Horino, M., Yanagiya, R. and Mizoi, T. (2018) : Sustainable Community Development for Disaster Resilience and Human Resources Development for Disaster Risk Reduction - Katahira-Style Disaster Resilient Community Development -, Journal of Disaster Research, Vol.13, No.7, pp.1288-1297.

佐藤 健（2019）：片平子どもまちづくり隊による防災まちづくり，日本安全教育学会第20回山形大会講演予稿集・プログラム（印刷中）

柴山明寛（2019）：オープンフォーラム「震災の伝承と防災の未来～被災地で向き合う『災害と教育』」，自然災害科学，Vol.37，No.4，pp.339-364.

小野寺洋友・佐藤翔輔（2017）：気仙沼市立階上中学校における地域と連携した防災教育の実践－真の「未来の防災戦士」の育成を目指して－，第36回日本自然災害学会学術講演会講演概要集，pp.27-28.

桜井愛子・北浦早苗・村山良之・佐藤 健（2019）：地域に根ざした災害復興・防災教育プログラムの開発－石巻市立学校での「復興・防災マップづくり」

5年間の実践を踏まえてー，安全教育学研究，第18巻，第1号，pp.23-36.

佐藤 健（2019）：公開シンポジウム「防災教育は学校と地域が協働してこそ多様な価値が創造される」開催趣旨，日本安全教育学会第20回山形大会講演予稿集・プログラム（印刷中）

第 56 回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集

2019 年 9 月 11 日

発行：京都大学防災研究所 自然災害研究協議会

議長：釜井 俊孝（京都大学防災研究所）

渦岡 良介（京都大学防災研究所・自然災害研究協議会総務）

（お問い合わせ）電話：0774－38－4347

<http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/ndic/contents.html>

印刷：河北印刷株式会社